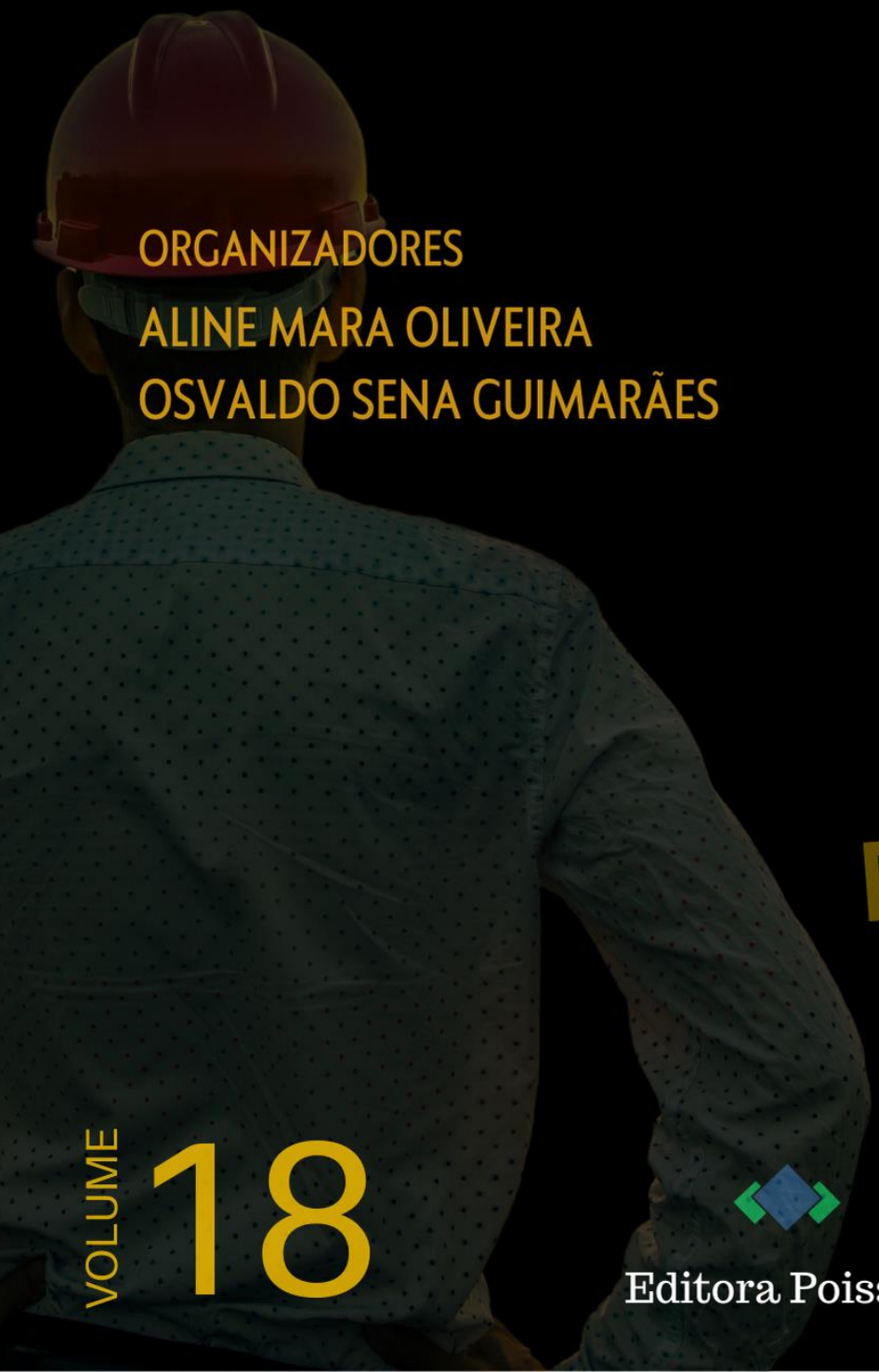
ENGENHARIA, GESTÃO E INOVAÇÃO



ORGANIZADORES
ALINE MARA OLIVEIRA
OSVALDO SENA GUIMARÃES

VOLUME 18

Editora Poisson

Aline Mara Oliveira
Osvaldo Sena Guimarães
(Organizadores)

Engenharia, Gestão e Inovação
Volume 18

1ª Edição

Belo Horizonte
Editora Poisson
2025

Editor Chefe: Dr. Darly Fernando Andrade

Conselho Editorial
Dr. Antônio Artur de Souza – Universidade Federal de Minas Gerais
MSc. Davilson Eduardo Andrade
Dra. Elizângela de Jesus Oliveira – Universidade Federal do Amazonas
MSc. Fabiane dos Santos
Dr. José Eduardo Ferreira Lopes – Universidade Federal de Uberlândia
Dr. Otaviano Francisco Neves – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais
Dr. Luiz Cláudio de Lima – Universidade FUMEC
Dr. Nelson Ferreira Filho – Faculdades Kennedy
MSc. Valdiney Alves de Oliveira – Universidade Federal de Uberlândia

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

E57

Engenharia, Gestão e Inovação – Volume 18/ Organizadores:Aline Mara Oliveira,Osvaldo Sena Guimarães – Belo Horizonte - MG: Editora Poisson, 2025

Formato: PDF
ISBN: 978-65-5866-493-2
DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2

Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia

1. Engenharia 2. Educação. I. OLIVEIRA, Aline Mara II. GUIMARÃES,Osvaldo Sena III. Título.

CDD-620

Sônia Márcia Soares de Moura – CRB 6/1896

O conteúdo deste livro está licenciado sob a Licença de Atribuição Creative Commons 4.0.
Com ela é permitido compartilhar o livro, devendo ser dado o devido crédito, não podendo ser utilizado para fins comerciais e nem ser alterado.

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos seus respectivos autores.

Esse e outros títulos podem ser baixados gratuitamente em www.poisson.com.br
Entre em contato pelo contato@poisson.com.br

SUMÁRIO

Capítulo 1: Eficiência e princípio da conservação da energia em sistema fotovoltaico: um estudo de caso em Macapá-AP 06

Marcos Carvalho Souza, Julielson Monteiro de Santana, Claudionor de Oliveira Pastana, Gerson Anderson de Carvalho Lopes

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.01

Capítulo 2: Análise do consumo de energia elétrica em batedeiras de açaí em Macapá-AP para estudo de viabilidade econômica da implantação de energia fotovoltaica 26

Edson Alves Oliveira, Joana D'arc Maurício Rocha, Cleyson Santos de Paiva, Gerson Anderson de Carvalho Lopes

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.02

Capítulo 3: Estudo de viabilidade técnica e econômica de mudança de matriz energética para a geração de vapor 49

Luis Guilherme Barbosa Custódio, Natália Souza de Jesus, Paulo de Souza Pacheco Junior, Thyago Carvalho Marques, Fernando Nunes Belchior

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.03

Capítulo 4: Acesso à energia, gênero e pobreza energética 65

Thamyrys Marques Azevedo, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.04

Capítulo 5: Panorama dos instrumentos regulatórios do Hidrogênio Verde no Brasil 80

Abdiel Jônatas Alves da Silva, Lara Carla Freitas Rodrigues, Mirelli Soares da Silva, Paulo Danton Félix da Costa, Pedro Victor de Sousa Albuquerque, Thamyrys Marques Azevedo, Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.05

Capítulo 6: Aplicação do perfil ILT (*Injection Logging Tool*) em poços injetores para gerenciamento de reservatórios 95

Marcus Vinicius Batista de Morais, Daniel Viana de Freitas, Jardel Dantas da Cunha, Antônio Robson Gurgel, Keila Regina Santana, Andréa Francisca Fernandes Barbosa

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.06

Capítulo 7: Potenciais impactos ambientais da disposição de lodos de estações de tratamento de águas em solos 110

Juscimara Rodrigues Silva, Ana Carolina Brants Menezes, Fabiana Alves Fiore Pinto

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.07

SUMÁRIO

Capítulo 8: Aplicação da modelagem e simulação do sistema de abastecimento de água potável em um bairro residencial 128

Dener Martins dos Santos, Jonatan Ilídio da Silva, Gedeão Alberto da Silva, Jeferson Carvalho dos Santos, Paulo Felipe Junior, Paulo Cuconato

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.08

Capítulo 9: Aplicação da Metodologia Paver para análise de condição do pavimento em trecho da RN-233 155

Wendel Silva Cabral

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.09

Capítulo 10: Avaliação do desempenho da segurança de tráfego de sistemas viários do tipo binários no município de Fortaleza-CE 177

Larissa Antônia Barbosa Lima, Viviane Píccolo Campos

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.10

Capítulo 11: The use of FactSage™ to determine crystalline phases in blast furnace slag-based glass ceramic 191

Cátia Fredericci

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.11

Capítulo 12: CAD e CAE em um curriculo contemporâneo - estudo da construção de aeronave – Fase I 203

Evandro Cardozo da Silva

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.12

Capítulo 13: Órtese de monitoramento da região lombar 218

Ana Augusta de Carvalho Rangel, Lívian Cerqueira Mousinho Cordeiro de Sousa, Lucas de Sá Penaforte, Maria Beatriz da Costa Gonçalves, Mizael Cristino de Oliveira Queiroz, Alexandre Magnus Fernandes Guimarães

DOI: 10.36229/978-65-5866-493-2.CAP.13

Autores 227

Capítulo 1

Eficiência e princípio da conservação da energia em sistema fotovoltaico: um estudo de caso em Macapá-AP

Marcos Carvalho Souza
Julielson Monteiro de Santana
Claudionor de Oliveira Pastana
Gerson Anderson de Carvalho Lopes

Resumo: A energia fotovoltaica é uma importante fonte de energia renovável e vem sendo crescentemente aplicada em residências e estabelecimentos comerciais na cidade de Macapá. Nesta monografia investiga-se a eficiência e o princípio da conservação da energia em sistemas fotovoltaicos (FV) como uma abordagem fundamental para otimizar o desempenho desses sistemas. Com a crescente demanda por fontes de energia renováveis, os sistemas fotovoltaicos emergem como uma solução viável para a geração de eletricidade limpa. No entanto, para garantir a máxima eficiência na conversão de energia solar em eletricidade, é essencial entender e aplicar os princípios básicos da física e, consequentemente, seus aspectos matemáticos. Utilizou-se como estudo de caso uma residência da cidade de Macapá, considerando-se os dados referentes ao ano de 2024. Observou-se e foram discutidos os fatores que afetam a eficiência como chuvas, sombreamento, presença de poeira e a temperatura. Além disso analisou-se a conservação de energia tanto na etapa de conversão da energia luminosa em eletricidade quanto na etapa de consumo da energia pela residência. Portanto, este estudo contribui tanto profissionais da área de sistema fotovoltaicos quanto para o ensino de princípios físicos e matemáticos em um contexto atual e relevante como são as energias renováveis.

Palavras-chave: eficiência, conservação da energia, energia solar, energias renováveis, sistemas fotovoltaicos.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por fontes de energia renováveis tem se intensificado globalmente, impulsionada pela crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir a dependência de recursos não renováveis. Nesse contexto, os sistemas fotovoltaicos emergem como uma solução promissora para a geração de eletricidade limpa e sustentável.

No Estado do Amapá várias localidades "apresentam significativo potencial para aproveitamento fotovoltaico durante todo o ano" conforme apontam Marques et al. (2012), que investigaram a variação da radiação solar global (RSG) nas localidades amapaenses de Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque durante o período de 2006 a 2008. Os autores concluíram na época que "este potencial sugere uma viabilidade estratégica de instalação de sistemas fotovoltaicos, tanto em sistemas urbanos consolidados quanto em comunidades remotas para geração de energia elétrica" (Marques et al., 2012).

Conforme previsto pelos autores supracitados, o que se observou nas últimas duas décadas no Amapá foi um aumento significativo no número de painéis solares instalados em residências e estabelecimentos comerciais, bem como no número de empresas dedicadas ao setor de energia solar.

Esse crescente mercado tecnológico segue motivando pesquisas científicas atuais, não só na área de engenharia como inclusive em matemática, modelos de estimativa de radiação solar para Macapá com base na amplitude térmica do ar. Segundo Moura et al. (2024):

> Com o crescimento do interesse no aproveitamento da energia solar no estado do Amapá, através de sistemas fotovoltaicos, a estimativa de radiação solar global diária média mensal, através de modelos matemáticos, é de grande utilidade na prospecção de regiões com potencial para exploração dessa energia (Moura et al., 2024).

A eficácia dos sistemas fotovoltaicos está fundamentada em princípios físicos bem estabelecidos, entre os quais se destacam a eficiência e o princípio da conservação da energia, fundamentais em diversas áreas como a mecânica, a termodinâmica e o eletromagnetismo (Halliday; Resnick; Walker, 2016a, 2016b, 2016c).

A eficiência de um sistema é a grandeza que descreve a fração da energia recebida que é convertida em trabalho útil ou converter essa energia em outra forma que seja desejável. O princípio da conservação da energia, por sua vez, é fundamental na física e descreve a relação entre diferentes formas de energia em um sistema fechado, indicando que a energia total permanece constante ao longo do tempo, podendo apenas ser transformada de uma forma para outra (Nussenzveig, 2018).

Este estudo tem como objetivo investigar a influência da eficiência e do princípio da conservação da energia no desempenho dos sistemas fotovoltaicos. Ao compreender como esses princípios se manifestam na conversão de energia solar em eletricidade, é possível otimizar o design, a operação e a manutenção desses sistemas, maximizando sua eficiência e contribuindo para a transição energética rumo a um futuro mais sustentável.

Foram abordados aspectos teóricos e práticos relacionados ao funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, destacando a importância da conservação da energia em cada etapa do processo, desde a absorção da luz solar até a entrega de eletricidade à rede elétrica.

Formulou-se o seguinte objetivo de pesquisa: verificar e discutir os fatores relevantes para a eficiência e o princípio da conservação de energia em sistemas fotovoltaicos. Para tanto, realizou-se pesquisa bibliográfica e documental para identificar elementos e características dos elementos físicos e matemáticos que envolvem a eficiência e conservação da energia em sistemas fotovoltaicos e, em seguida, selecionou-se uma residência na cidade de Macapá equipada com painéis solares para demonstrar na prática, por meio de um estudo de caso, como ocorre e o que afeta a eficiência e o princípio da conservação de energia em um sistema fotovoltaico.

1.1. JUSTIFICATIVA

Relevância Acadêmica e Científica: Este tema é relevante do ponto de vista acadêmico e científico, pois envolve uma compreensão profunda dos princípios teóricos e sua aplicação na tecnologia fotovoltaica, muito importante na atualidade. Trata-se, ainda, da aplicação de princípios importantes da física, que são eficiência e conservação da energia.

Importância Prática: Os sistemas fotovoltaicos desempenham um papel crucial na busca por fontes de energia limpa e renovável. Compreender como a energia é conservada e utilizada eficientemente nesses sistemas é essencial para melhorar sua eficácia e desempenho, contribuindo assim para a sustentabilidade energética.

Relevância Social e Ambiental: Em um contexto global de preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, os sistemas fotovoltaicos representam uma alternativa promissora às fontes de energia tradicionais. Ao estudar e otimizar o uso da energia nos sistemas fotovoltaicos, contribuímos para mitigar os impactos ambientais negativos associados à geração de energia convencional.

Aplicações Práticas e Potenciais Benefícios Econômicos: Compreender o uso eficiente da energia em sistemas fotovoltaicos não apenas tem implicações ambientais e sociais, mas também impactos econômicos significativos. A otimização da eficiência energética desses sistemas pode levar a reduções de custos operacionais e tornar a energia solar uma opção mais competitiva economicamente comparado a fontes de energia convencionais.

Contribuição para o Avanço Tecnológico: Ao investigar e compreender a eficiência e conservação da energia em sistemas fotovoltaicos, contribuímos para o avanço do conhecimento científico e tecnológico nessa área. Isso pode contribuir para o desenvolvimento de novas técnicas, materiais e dispositivos que otimizem a eficiência e confiabilidade dos sistemas fotovoltaicos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. PRINCÍPIO DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA E EFICIÊNCIA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Embora não haja uma definição geral do que seja energia, costuma-se entendê-la, em Física, como a medida da capacidade de um sistema em realizar trabalho. Sua unidade de medida no Sistema Internacional de unidades (S.I.) é o Joule (J) (Halliday; Resnick; Walker, 2016a, 2016b, 2016c; Nussenzveig, 2018). A energia pode ser de diferentes tipos, e um desses tipos é a energia cinética K, que é a energia associada ao movimento, que pode ser calculada como:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 \qquad (1)$$

Em que *m* é a massa da partícula considerada e *v* é a sua velocidade. Outra forma de energia é a energia potencial (U), que está associada à configuração de um sistema submetido à ação de uma força conservativa, que por sua vez são forças que podem ser escritas como o gradiente de uma função chamada potencial:

$$F(x) = -\frac{dU(x)}{dx}. \quad (2)$$

A energia mecânica (E_{mec}) de um sistema é a soma da energia cinética (K) com a energia potencial (U) do sistema.

$$E_{mec} = K + U \quad (3)$$

Se apenas forças conservativas realizam trabalho em um sistema isolado, isto é, é um sistema no qual nenhuma força externa produz variações de energia, a energia mecânica E_{mec} do sistema não pode variar. Este princípio de conservação da energia mecânica pode ser escrito na forma:

$$K_2 + U_2 = K_1 + U_1, \quad (4)$$

Em que os índices se referem a diferentes instantes de um processo de transferência de energia (antes e depois). Este princípio de conservação pode também ser escrito na forma:

$$\Delta E_{mec} = \Delta K + \Delta U = 0. \quad (5)$$

Embora escrito na forma acima para a energia mecânica, este Princípio de Conservação de Energia ou Lei de Conservação de Energia (também conhecido como Primeiro Princípio da Termodinâmica), pode ser generalizado para qualquer tipo de energia. Ele afirma que a quantidade total de energia em um sistema físico isolado permanecerá sempre a mesma, embora internamente ao sistema possa haver conversão de energia de um tipo em outro.

Há várias situações nas quais a energia é transferida entre objetos e sistemas, da mesma forma como o dinheiro é movimentado entre contas bancárias. Em cada uma dessas situações, a energia envolvida não varia, ou seja, nenhuma parte da energia não pode aparecer ou desaparecer "magicamente". A energia total é a soma da energia mecânica, da energia térmica e de qualquer outro tipo de energia interna (ΔE_{int}) do sistema.

Esta lei de conservação da energia não é algo que deduzimos a partir de princípios básicos da física, mas se baseia em resultados experimentais. Os cientistas e engenheiros nunca encontraram uma exceção.

Um sistema fotovoltaico é um sistema que converte a energia solar em energia elétrica. Sendo assim, o primeiro tipo de energia relevante para essa análise é a Energia total luminosa (E_T), que, segundo Kalogirou (2013) e o ASHRAE Handbook (2019) é calculada a partir da Irradiância solar (I), da área total das placas solares (At) e do tempo de exposição ao Sol (T), da seguinte forma:

$$E_T = I \times At \times T \quad (6)$$

A Irradiância solar é tipicamente medida em $\frac{W}{m^2 \cdot dia}$, a área total das placas em m^2 e o tempo de exposição ao Sol em *dia*.

Se as placas solares fosses 100% eficientes (impossível teoricamente) elas converteriam em energia elétrica a totalidade da energia solar recebida. Porém, na realidade, apenas uma fração da energia solar é de fato convertida em elétrica. Para mensurar isso, define-se a eficiência do painel solar (%):

$$\% = \frac{E_g}{E_T} \times 100 \quad (7)$$

Nota-se na equação 7 que a eficiência é simplesmente o percentual de energia elétrica gerada pela placa solar (E_g) em relação à energia total.

Pelo princípio da conservação de energia, o percentual não convertido da energia solar não pode ser perdido. Sendo assim, esse excedente de energia é cedido ao ambiente, principalmente na forma de calor.

Após ser gerada a energia elétrica, essa é distribuída pela instalação elétrica da residência. Porém, devido à resistência dos fios, há uma nova perda por efeito Joule (IEEE, 2021), que pode ser calculado por:

$$P_{Joule} = i^2 R \quad (8)$$

Em que P_{Joule} é a potência dissipada pelo efeito Joule (medida em W), i é a corrente elétrica que atravessa os fios (medida em A) e R é a resistência elétrica dos fios (medida em Ω). A Potência é definida como a energia por unidade de tempo (Searway; Jewett, 2018):

$$P = \frac{E}{T} \quad (9)$$

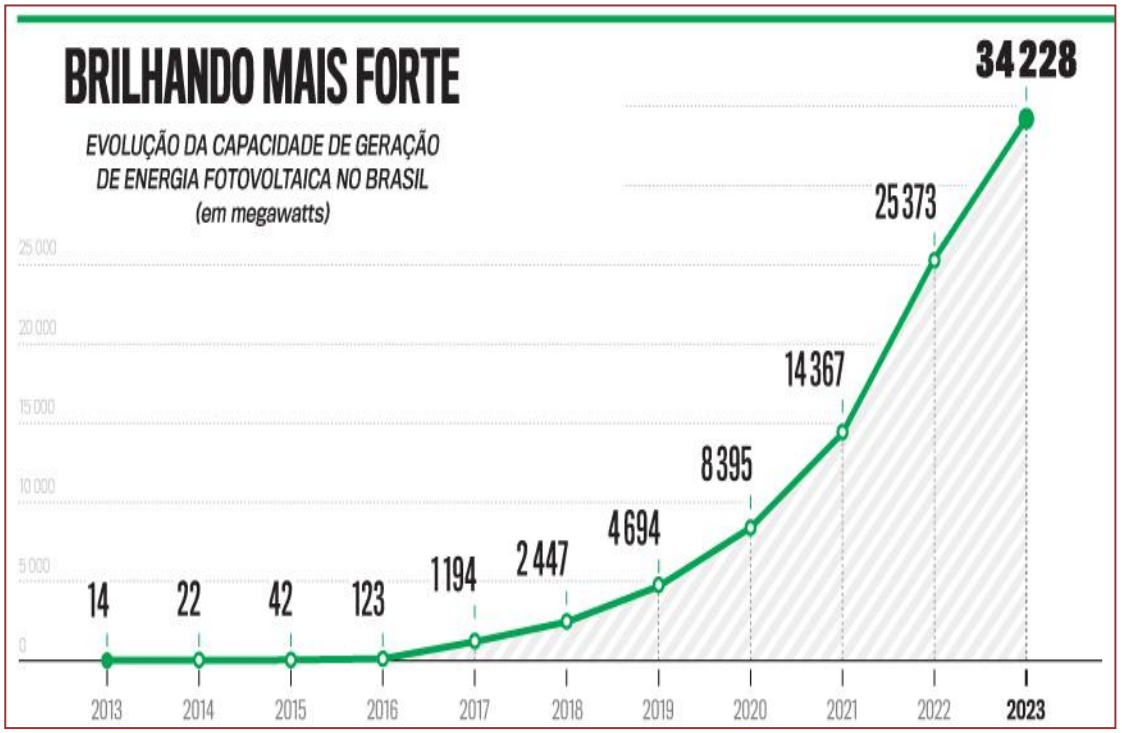
2.2. ENERGIAS RENOVÁVEIS

Por definição, a Energia Solar Fotovoltaica é a energia elétrica gerada através da conversão direta da luz do Sol por meio de materiais semicondutores (Efeito Fotovoltaico) contidos em células. Essas células fotovoltaicas são constituídas, em sua maioria, de silício dispostas em painéis modulares e, em conjunto com outros equipamentos, formam o chamado Sistema Fotovoltaico (Mosqueira, 2020).

O mundo vive uma grande transformação energética, com a taxas de crescimento, sem precedentes, das fontes renováveis de energia, em particular, das fontes solar e eólica. A energia solar adicionou em 2017 mais capacidade instalada do que as usinas a carvão, gás e nuclear juntas. Em 2018 repetiu-se o feito, com 102 GW, ficando o carvão em segundo lugar, com 50 GW, colado com a eólica que incorporou 49 GW e o gás natural em seguida, com 46 GW. Já em 2019, os números foram 117 GW para a fonte solar, 61 GW de eólica e 18 GW para o carvão ao se considerem as capacidades líquidas adicionadas. O ano de 2020 viu a repetição da tendência de predominância da fonte solar como tecnologia com a maior capacidade instalada anualmente. Apesar da pandemia, foram instalados globalmente 141 GW. Com isso, dá para observar o grande avanço que a energia solar estar proporcionando e como vem se destacando entre as outras fontes de energia renovável e não renovável (Pereira; Rüther, 2011; Mosqueira, 2020).

O gráfico da Figura 1 a seguir mostra o avanço da energia solar no Brasil:

Figura 1: avanço da energia solar no Brasil



Fonte: Veja, 2024.

Pode-se observar na imagem acima que com o decorrer dos anos a energia solar vem sendo bastante procurada pela população brasileira pois é uma nova forma de se ter uma energia limpa e renovável.

As fontes de energias alternativas renováveis vêm numa crescente aceleração e motivadas em todos os países por conta das consequências severas em relação aos impactos ambientais produzidos pelas energias não renováveis como o petróleo, gás natural, carvão mineral e combustíveis nucleares, em razão da luta contra o aquecimento global. Visto essa preocupação com as energias não renováveis em relação aos seus impactos ambientais causados e a crescente demanda de energia em todo o mundo, o grande desafio aos longos dos anos será a produção de mais energia emitindo menos gases de efeito estufa. O Planejamento de Recursos Integrados (PRI) se inclui nesse processo como forma de minimização dos custos, impactos ambientais e sociais das energias renováveis levantadas anteriormente, possibilitando um planejamento a curto ou a longo prazo observando as dimensões sociais, políticas, técnico-econômicas e ambientais. O aproveitamento da energia sempre gera algum tipo de impacto ambiente seja ela renovável ou não renovável, de pequena ou grande proporção. Porém, esses impactos podem ser minimizados quando associados o planejamento de recursos integrados, visto que eles visam um mundo mais sustentável, promovendo medidas políticas e econômicas (Nascimento; Alves, 2016).

As fontes de energia renováveis estão cada vez mais importantes para o mundo, principalmente quando falamos de proteção ambiental. Neste sentido, a redução da

emissão de carbono, em comparação com os combustíveis fósseis, está na linha de frente de suas vantagens. Entretanto, outros benefícios, como por exemplo se tratar, também são determinantes para seu uso. Algumas de suas vantagens são: Possibilita o desenvolvimento sustentável, traz autonomia energética para os países, combate as mudanças climáticas, se trata de um recurso inesgotável, geram novos empregos, é mais barata a longo prazo e garante o fornecimento de eletricidade.

As fontes renováveis de energia são aquelas em que os recursos naturais utilizados são capazes de se distinguir, ou seja, são considerados inesgotáveis, além de diminuir o impacto ambiental e contornar o uso de matéria prima que normalmente é não renovável. Dentre as energias alternativas renováveis, mais conhecidas atualmente encontram-se a energia eólica, energia hidráulica, energia do mar, energia geotérmica, biomassa e energia solar.

Embora as novas tecnologias de aproveitamento de energia ainda tenham um alto custo de implantação, vale ressaltar que a energia solar, apresenta um curto prazo, tanto de implantação, quanto de retorno financeiro, além de minimizar o impacto no meio ambiente. O Brasil, em relação à energia solar, é considerado privilegiado, visto a imensa incidência de raios solares emitidos em seu território e pelas reservas de quartzo para a produção do silício, utilizados na fabricação de células solares. Ainda em razão disso vários são os benefícios como gases não poluentes na atmosfera comparada a outras energias, a mínima manutenção em suas centrais, a sua utilização em lugares remotos ou de difícil acesso, e uma grande vida útil de seus sistemas implantados. A conservação de energia solar é um processo fundamental no campo da energia renovável.

> A energia solar fotovoltaica é definida como a energia gerada por meio da conversão direta da radiação solar em eletricidade. Isto se dá, por meio de um dispositivo conhecido como célula fotovoltaica que atua utilizando o princípio do efeito fotoelétrico ou fotovoltaico. Com isso o inversor recebe a energia contínua dos módulos fotovoltaicos e transforma em energia alternada que vai para rede consumidora ou para um banco de baterias (Lana et al., 2015).

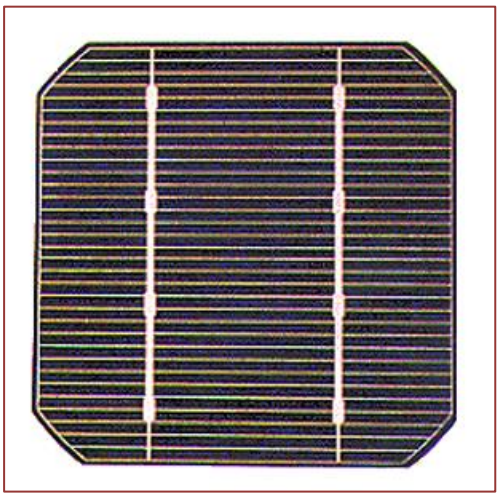
2.3. TIPOS DE CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

As células fotovoltaicas são os elementos responsáveis pela conversão direta da luz solar em eletricidade. É neles que ocorre o efeito fotoelétrico. As primeiras células produzidas possuíam baixo rendimento, em torno de 2% e custava em média US$ 600/W. Porém, atualmente já se pode encontrar com rendimento acima de 10%, podendo atingir 18% dependendo do material utilizado e com o custo médio de US$ 6,00/W, tendendo a diminuir cada vez mais. Elas podem ser fabricadas usando-se diversos tipos de materiais semicondutores. Porém as mais utilizadas são as de silício, que podem ser construídas e classificadas de acordo com a sua estrutura molecular, que são os monocristalinos, policristalisnos e silício amorfo (Braga, 2008).

A célula de silício monocristalino é historicamente a mais usada e comercializada como conversor direto de energia solar em eletricidade e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem construído. A fabricação da célula de cilício começa com a extração do cristal de cilício. Este material é desoxidado em grandes fornos purificados e solidificados. Este processo atinge um grau entre 98 e 99% o que é razoavelmente sob o ponto de vista energético e custo. Este silício para funcionar como célula fotovoltaica

necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar à faixa de 99,9999% (Braga, 2008).

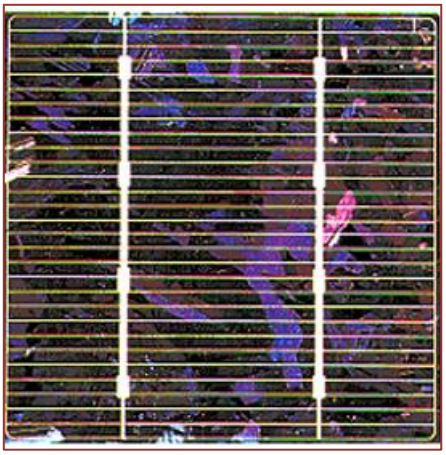
Figura 2: Célula de silício monocristalino



Fonte: Braga, 2008.

As células de silício policristalino são maios baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em relação as células monocristalino. Podem ser preparadas pelo corte de um lingote de fitas ou depositando um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por emersão. Nestes dois últimos casos somente o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características especificas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impureza, eficiência teórica máxima do processo da conversão da luz solar em energia elétrica é de 27%, mas valores nas faixas de 15 e 18% são encontrados em produtos comerciais (Braga, 2008).

Figura 3: Célula de silício policristalino



Fonte: Braga, 2008.

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem nas estruturas dos átomos. A utilização de silício amorfo pra uso em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação. Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil (Braga, 2008).

Figura 4: Célula de silício amorfo

Fonte: Braga, 2008.

3. METODOLOGIA

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

Nessa monografia é desenvolvida uma pesquisa do tipo explicativa. Segundo Costa e Costa (2009, p.132), a pesquisa explicativa "busca esclarecer que fatores contribuem, de alguma forma, para a ocorrência de algum fenômeno". E ainda, segundo Gil (2007, p.42), "esse é o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade, porque explica a razão, o porquê das coisas".

Quanto à abordagem, a pesquisa em questão é quantitativa. Algumas características da pesquisa quantitativa, segundo Costa e Costa (2009), são: é objetiva; é orientada à busca da magnitude e das causas dos fenômenos; testa a teoria; envolve mensuração; os elementos básicos da análise são números; o raciocínio envolvido é lógico e dedutivo; é orientada aos resultados, é replicável e generalizável.

3.2. PÚBLICO-ALVO

Os públicos-alvo desta pesquisa são:

a) físicos, engenheiros e técnicos que trabalham com fabricação, instalação e manutenção de painéis solares;

b) pesquisadores que buscam analisar os processos de funcionamento de painéis solares, visando otimização e desenvolvimento tecnológico;

c) professores de matemática, física e áreas afins que desejam contextualizar suas aulas;

d) professores de cursos técnicos e demais modalidades de ensino envolvendo eletricidade, placas solares, energias renováveis e tecnologias residenciais.

3.3. TIPOS DE PESQUISA

Para cumprimento dos dois primeiros objetivos específicos, procedeu-se à pesquisa bibliográfica e pesquisa documental.

Segundo Costa e Costa (2009, p.133), a pesquisa bibliográfica "é aquela realizada em livros, revistas, jornais etc. Ela é básica para qualquer tipo de pesquisa, mas, também, pode esgotar-se em si mesma".

Segundo Gil (2007, p.46), "a pesquisa documental segue os mesmos passos da pesquisa bibliográfica", entretanto "na pesquisa documental as fontes são muito mais diversificadas e dispersas". Essas fontes podem ser "relatórios de pesquisas, relatórios de empresas, tabelas estatísticas etc.".

Para o cumprimento do terceiro objetivo específico, procedeu-se ao estudo de caso. Segundo Costa e Costa (2009, p.132), "é um estudo limitado a uma ou poucas unidades [...]. É uma pesquisa detalhista e profunda".

No caso desta pesquisa, a unidade utilizada para o estudo de caso foi uma residência no município de Macapá-AP com painéis solares instalados, cujos dados de geração e consumo de um ano (2024) foram utilizados.

3.4. LOCUS

O local da pesquisa escolhido para a realização do estudo de caso foi a residência do senhor Diego de Oliveira Martins (autorização no Anexo A), localizada no endereço via Terra de Santa Cruz, 53, bairro Pedrinhas, cidade de Macapá, capital do Estado do Amapá.

Essa residência teve os painéis solares instalados na data 19/12/2023 pela empresa RGB Energia. O primeiro autor desta pesquisa é funcionário desta empresa e participou do processo de instalação dos painéis solares da residência em questão.

A escolha desta residência se deu em virtude de o autor da pesquisa trabalhar na empresa, ter participado da instalação, ter sido autorizado pelo proprietário da residência e ter tido acesso aos dados de projeto, consumo e geração de energia no aplicativo da empresa.

3.5. PERÍODO DE ANÁLISE

Neste estudo foi considerado os dados referentes ao período de 01/01/2024 a 31/12/2024.

3.6. COLETA DE DADOS

A coleta de dados se deu por meio de:

a) Pesquisa bibliográfica:

Foram consultados livros físicos e online, artigos, monografias e dissertações disponíveis online.

b) Pesquisa documental:

Foram utilizados o projeto do sistema fotovoltaico instalado na residência (Anexo B), o memorial técnico-descritivo das placas solares (Anexo C) e dados do aplicativo eSolar Air (Anexo D) sobre geração e consumo mensal da residência durante o ano de 2024, utilizado pela empresa RGB Energia.

c) Acesso a páginas de instituições de referência sobre temas específicos:

Foram consultadas as páginas oficiais de instituições que monitoram o clima para obter dados de incidência solar, temperatura média e precipitação em Macapá no ano de 2024.

Todos esses instrumentos de coleta de dados foram escolhidos de modo a obter o máximo de dados quantitativos relativos ao estudo em questão, pois, de acordo com Rudio (1982, p.89), "os instrumentos mais úteis à pesquisa são os que, além de assinalar a presença ou ausência de um fenômeno, são ainda capazes de quantificá-lo, dando-nos uma medida sobre o mesmo".

3.7. TRATAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Para a elaboração da tabela geral de produção e consumo energético do sistema fotovoltaico (tabulação dos dados), recorreu-se ao cálculo físico das variáveis envolvidas a partir dos dados coletados. Para a discussão a respeito da eficiência e do princípio da conservação de energia no sistema fotovoltaico, realizou-se a análise comparativa e crítica dos valores da tabela geral de produção e consumo energético, comparando com dados da literatura e dos documentos técnicos consultados.

Tanto a elaboração da tabela geral quanto a descrição dos princípios físicos envolvidos se enquadram no método quantitativo, descrito a seguir:

> "O método quantitativo caracteriza-se pelo processo de quantificação, tanto no processo de coleta de informações, como no tratamento destas por meio de técnicas estatísticas e procedimentos matemáticos. Frequentemente empregado nos estudos [...] de relação de causalidade entre fenômenos, o método quantitativo representa, em princípio, a intenção de garantir a precisão dos resultados, evitando distorções de análise e interpretação, possibilitando aumentar a margem de segurança na comprovação das hipóteses formuladas" (Seabra, 2001, p.55).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. TABELA GERAL DE PRODUÇÃO E CONSUMO ENERGÉTICO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a construção dessa tabela, foi preciso conhecer os seguintes valores:

- Irradiação solar (I): Dado fornecido através do site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB, 2024).

- Energia elétrica gerada pela placa solar (E_g): Dado fornecido através do app ou site: eSolar Air (Anexo D), Disponível em: <https://fop.saj-electric.com/saj/login>. Onde são fornecidos todos os dados do que é gerado pela usina fotovoltaica.
- Energia total luminosa (E_T): Para encontrar o valor, utiliza-se a equação (6).
- Eficiência do painel solar (%): Calculado a partir da equação (7).
- Energia consumida pela casa (E_c): Foi retirado do memorial técnico-descritivo (Anexo C), fornecido pela empresa RGB Energia.
- Diferença de energia (Dif): É feita a subtração da energia gerada pela usina solar com a energia consumida pela residência:

  $$Dif = Eg - Ec. \quad (10)$$

- Diferença percentual (Dif%): É calculada a partir da equação:

  $$Dif\% = \frac{Dif}{E_g} \times 100 \quad (11)$$

- Quantidade de módulos utilizada: Foi obtida do memorial técnico-descritivo (Anexo C). É igual a 32 módulos.
- Área dos módulos fotovoltaicos: Para isso é preciso saber o comprimento e largura dos módulos fotovoltaicos, que foi obtido também pelo memorial técnico-descritivo (Anexo C):

  Comprimento: 2,27m Largura:1,13m

  Área = 2,27×1,13 = 2,5651m^2
- Área total dos módulos fotovoltaicos (A_T)

Para encontrar o valor, basta fazer a multiplicação dos valores acima e encontra-se o resultado: 82,0832 m^2

Área total (A_T) = 32×2,5651m^2 = 82,0832 m^2

Para calcular a Energia solar incidida sobre a residência ao longo de um mês, por exemplo, o mês de janeiro, faz-se o seguinte cálculo:

$$E_T = I \times A_T \times T$$

E_T = 4,71×82,0832 × 31

E_T = 11.984,968 KWh

Em que T = Tempo em dias, portanto é igual a 31 para o mês de janeiro.

Em seguida, basta replicar os cálculos para todos os meses, respeitando a quantidade de dias para cada mês.

Ao final, foi acrescentada uma linha com os valores médios calculados a partir dos valores mensais. Isto é, a linha de baixo da Tabela 1 a seguir representa os valores médios anuais das grandezas envolvidas.

Tabela 1: Tabela geral de geração e consumo energético do sistema fotovoltaico

Mês/ nº de dias	Irradiação solar (kWh/m².dia)	Energia elétrica gerada pela placa solar (kWh)	Energia total luminosa (KWh)	Eficiência da placa (%)	Energia consumida pela casa (kWh)	Diferença de energia (kWh)	Diferença percentual (%)
01 / 31	4,71	1446,80	11.984,968	12,071%	1860	- 413,2	- 28,56%
02 / 29	4,32	1908,56	9.928,783	19,222%	1666	+ 242,56	12,71%
03 / 31	4,23	1784,72	10.763,570	16,581%	1784	+ 0,72	0,04%
04 / 30	4,29	1844,26	10.564,107	17,457%	1774	+ 70,26	3,81%
05 / 31	4,71	1927,11	11.984,968	16,079%	1852	+ 75,11	3,89%
06 / 30	4,97	1901,36	12.238,605	15,535%	1856	+ 46,36	2,39%
07 / 31	5,09	2177,58	12.951,908	16,812%	1856	+ 321,58	14,77%
08 / 31	5,48	2448,39	13.944,294	17,558%	1756	+ 692,39	28,28%
09 / 30	5,62	2480,58	13.839,227	17,924%	1752	+ 728,58	29,37%
10 / 31	5,48	2580,17	13.944,294	18,503%	2120	+460,17	17,83%
11 / 30	5,46	2448,28	13.436,841	18,220%	2330	+118,28	4,83%
12 / 31	4,94	2154,03	12.525,626	17,135%	2217	+96,12	4,15%
Média:	4,94	2091,82	12.342,27	16,925%	1901,917	203,2442	7,74%

Ao analisar a Tabela 1 acima, pode-se observar que o mês 01 (janeiro) teve percentual de energia negativo. Essa discrepância se deu pelo fato de que o mês de janeiro é um período muito chuvoso no Estado do Amapá, e com isso a usina fotovoltaica teve uma redução de desempenho se comparada aos outros meses. Esse fato ocorre porque o cliente teve um consumo maior do que a produção da sua usina fotovoltaica.

Dito isto, seguindo a observação da Tabela 1, identifica-se que no mês 10 (outubro) a usina fotovoltaica teve sua maior produção e isso se deu, principalmente, porque outubro é um mês em que não se tem muitas presenças de chuva na cidade de Macapá, como será discutido na seção a seguir.

4.2. ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Outro fato curioso e importante é que, segundo o fabricante, os módulos têm uma eficiência de 21,7%, conforme pode ser visto no Memorial técnico-descritivo (Anexo C), mas a tabela descredita claramente quando mostra diferentes produções de energia ao decorrer dos meses. Já é conhecido que a eficiência de um sistema fotovoltaico já instalado numa residência seja menor do que a eficiência nominal, conforme visto na Figura 5:

Figura 5: Comparação entre a eficiência nominal e real de sistemas fotovoltaicos

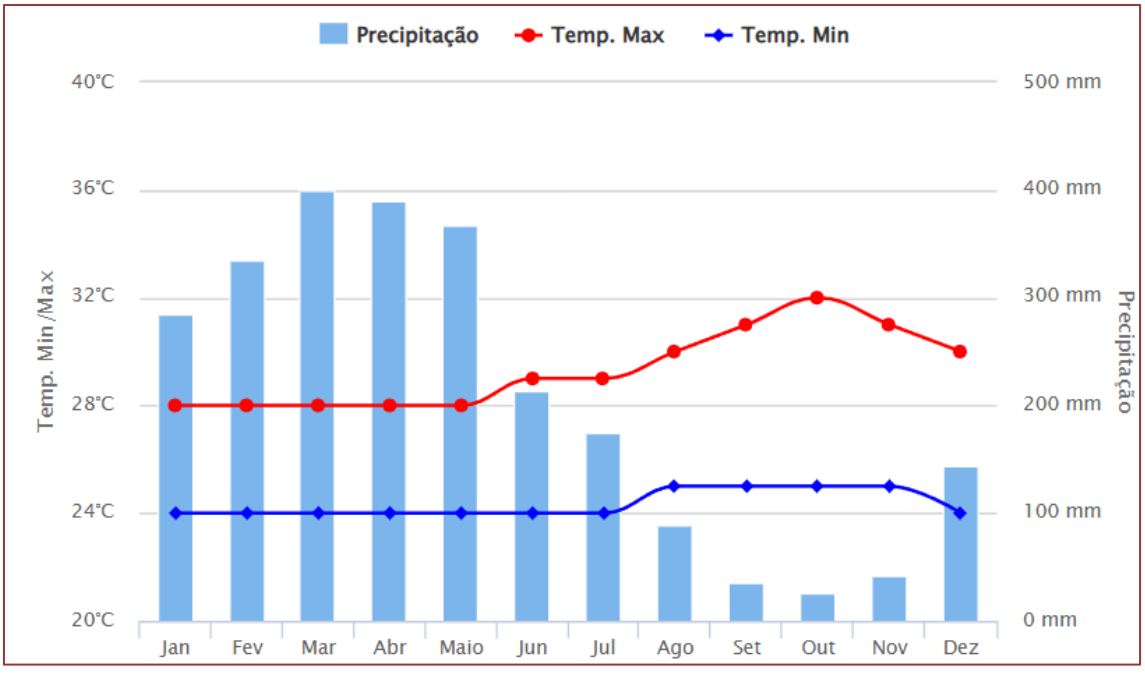
TIPO DE CÉLULA FOTOVOLTAICA	EFICIÊNCIA EM LABORATÓRIO	EFICIÊNCIA COMERCIAL
Silício Monocristalino	25%	15 a 18%
Silício Policristalino	20%	13 e 15%
Silício Amorfo	13%	5 a 8%

Fonte: SENAI, 2023a.

Essas variantes ocorrem porque o fabricante, durante a medição da eficiência, não leva em conta fatores como chuvas, sombreamentos, temperatura, inclinações, poeira etc. Ainda assim, pode-se notar na Tabela 1 que, em alguns meses, a eficiência ultrapassou os 18%, e no mês de fevereiro chegou a ultrapassar os 19%, chegando próximo do valor da eficiência nominal, mesmo com as variáveis ambientes. Este valor próximo a 18% é o esperado para sistema de silício monocristalino comercialmente, isto é, já instalado, diferente do nominal que é o valor medido em laboratório (SENAI, 2023a).

Sobre a diminuição de eficiência mencionada acima podemos discutir alguns aspectos. O primeiro deles é a redução de eficiência ocasionada por nuvens de chuva. Pode-se observar na tabela acima que os 6 menores valores da energia elétrica gerada correspondem os meses de janeiro a junho que coincidem com os maiores meses de chuva em Macapá, conforme pode ser constatado na Figura 6:

Figura 6: Índice pluviométrico e temperaturas máximas e mínimas mensais em Macapá no ano de 2024



Fonte: Climatempo, 2024.

De forma similar pode-se analisar na Tabela 1 que nos meses de julho a dezembro ocorreram os maiores valores de geração de energia, o que coincide com o período de menos chuva em Macapá, sendo o máximo de geração de energia foi no mês de outubro em que também ocorreu o menor índice pluviométrico, conforme mostra a Figura 6.

O segundo aspecto responsável pela diminuição da eficiência das placas solares foi o sombreamento.

> O sombreamento em instalações fotovoltaicas é extremamente prejudicial à produção energética. Isto porque a presença de sombra modifica a característica de tensão e corrente dos módulos conectados em série (SENAI, 2023b).

Vamos analisar os tipos de sombreamento e os efeitos destes sobre as placas solares.

> Sombreamentos podem ser basicamente de dois tipos: sombreamentos distantes, causados por objetos muito distantes como montanhas ou prédios afastados do arranjo fotovoltaico; ou sombreamentos próximos, causados por obstáculos como árvores, caixas d'água, edificações ou partes delas, antenas, etc, que projetam uma imagem com contornos na superfície do arranjo fotovoltaico (SENAI, 2023b).

Nas instalações da residência analisada foi possível constatar durante a instalação das placas solares a ocorrência de sombras sobre parte das placas durante diferentes horas do dia devido a platibandas contornado a laje em que foram instalados os módulos e devido as paredes de proteção da caixa d'água que também fica sobre a laje, conforme pode ser visto nas imagens a seguir:

Figura 7: Foto mostrando sombreamento causado pela platibanda no período da manhã no horário de 09:00h

Fonte: O autor.

Figura 8: Foto mostrando o sombreamento causado pelas paredes de proteção da caixa d'água no período da tarde no horário de 14:41h

Fonte: O autor.

Durante a instalação das placas foi constatado a existência de sombra pela platibanda em todas as horas de sol, havia platibanda todos os lados dos módulos. Já a sombra da caixa d'água passava a cobrir as placas a partir das 15h aproximadamente. Observou-se que o período de melhor funcionamento do sistema com a interferência mínima de sombra foi de 10h até as 15h.

As sombras existentes nesta instalação são do tipo próximo. "Os sombreamentos próximos são mais prejudiciais e normal mente levam a grandes perdas de produção" (SENAI, 2023b). Como esse sombreamento, ainda que parcial, ocorre todos os dias do ano, pode-se certamente considerá-lo como um dos responsáveis por fazer com que a eficiência média seja de 16,925%, isto é, abaixo dos 21,7% da eficiência nominal.

O terceiro aspecto que causa redução na eficiência é a temperatura.

> O aumento da irradiância incidente e/ou da temperatura ambiente produz um aumento da temperatura da célula e, consequentemente, tende a reduzir a sua eficiência. Isto se deve ao fato de que a tensão da célula diminui significativamente com o aumento da temperatura, enquanto que sua corrente sofre uma elevação muito pequena, quase desprezível. (Pinho; Galdino, 2014).

Como a temperatura na região norte é bastante elevada, sendo que a média anual em Macapá é de 28,5ºC (este valor é calculado a partir das médias mensais de temperatura em Macapá obtidas no site: pt.tutiempo.net/clima/12-2024/ws-820980.html), isso faz com que a eficiência seja baixa já que "a condição padrão para plotagem das curvas características dos módulos é definida para uma radiação solar 1000 W/m^2 e temperatura de 25°C na célula" (Braga, 2008). Logo percebe-se que tem uma diferença 3,5ºC a mais do que é a indicação padrão.

Além de a temperatura média ambiente ser mais alta do que a temperatura padrão de medição do fabricante, a temperatura na célula na cidade de Macapá facilmente atinge valores muito mais altos, como pode ser visto na figura abaixo:

Figura 9: Medição realizada nos painéis solares da residência em estudo no dia 25/01/2025 as 14:00h, marcando 56,7°C

Fonte: O autor.

Na literatura é possível encontrar uma equação que mostra a perda de eficiência de acordo com o aumento na temperatura (Green, 1982; IEC 60904-3, 2019):

$$\%(T) = \%_0[1 - \beta(T - T_0)] \quad (12)$$

Em que $\%(T)$ é a eficiência dos painéis solares a uma temperatura T, $\%_0$ é a eficiência a uma temperatura T_0 padrão de laboratório e β é uma constante dos painéis solares que mede o quanto a eficiência diminui com o aumento de temperatura. Essa constante depende dos materiais de que a placa é constituída e de suas dimensões. Observa-se que, como $\beta > 0$ e $(T - T_0) > 0$, logo $\%(T) < \%_0$.

Já segundo Duffie e Beckman (2013), pode-se acrescentar um termo de perdas resistivas a essa equação para calcular a eficiência real:

$$\%(T) = \%_0[1 - Perdas_{térmicas} - Perdas_{resistivas}] \quad (13)$$

Em que as perdas térmicas são devidas ao termo $\beta(T - T_0)$ na equação (12) e as perdas resistivas são devidas ao efeito joule mencionado na equação (8).

4.3. ANÁLISE DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA NO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para analisar a conservação da energia, devemos considerar cada uma das etapas envolvidas no processo.

A primeira etapa é a conversão da energia solar em energia elétrica que ocorre nas placas. A energia total luminosa média foi de 12.342,27 kWh e a eficiência média da placa foi de 16,925%, isso significa que 83,075% da energia total luminosa não foi aproveitada pelas placas, sendo perdida para o ambiente. Precisamos explicar o que ocorre com essa energia não aproveitada. Os dois fatores que explicam o que aconteceu com essa energia são: reflexão e absorção.

Reflexão: devido a placa ser espelhada ela devolve grande parte da energia incidente de volta ao ambiente.

Absorção: o silício e os materiais metálicos usados na confecção das placas absorvem parte da radiação, fazendo a placa aquecer.

Neste estudo não há elementos suficientes para avaliar o percentual refletido e absorvido da radiação solar, apenas é possível afirmar que estes dois fatores somados equivalem a 83,075% da energia total luminosa.

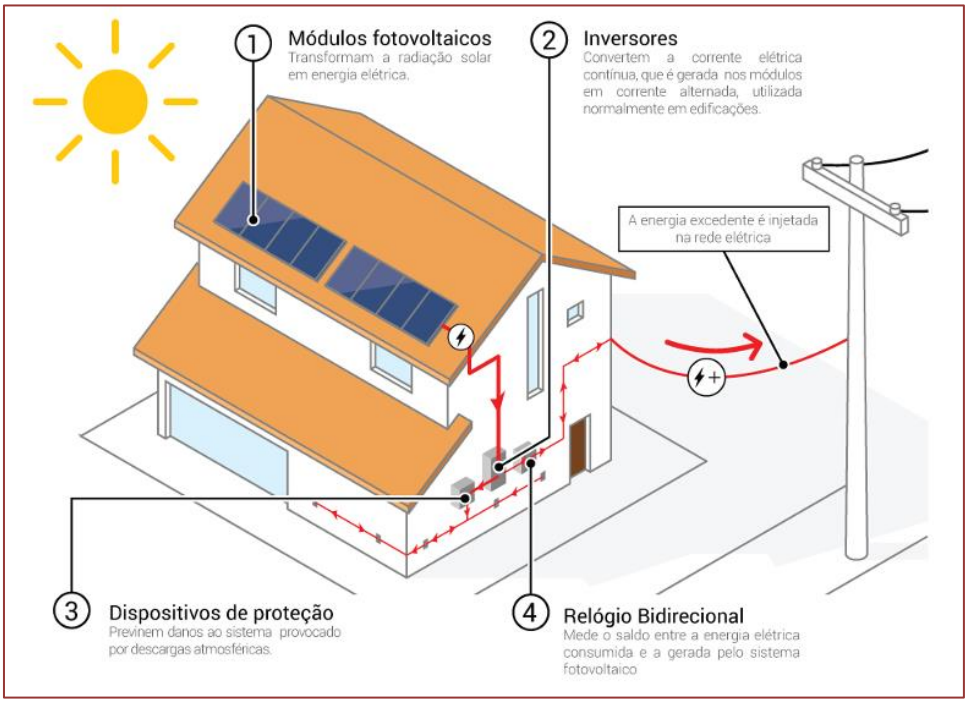
A segunda etapa é o consumo de energia pela residência. Sabe-se que a energia média total gerada pelas placas foi de 2.091,82 kWh enquanto a energia média total consumida pela residência foi de 1.901,92 kWh, o que um valor menor do que foi gerado. Precisamos explicar o que ocorre com essa diferença de energia que não foi consumida. Os dois fatores que explicam o que aconteceu são: perdas naturais e consumo abaixo do gerado.

Perdas naturais: como existe uma distância das placas até o inversor e outra distância do inversor até o quadro de distribuição, além da própria fiação da casa, há uma perda de energia em virtude do efeito Joule, que provoca aquecimento dos fios e é maior quanto maior for a distância de fios utilizados.

Consumo abaixo do gerado: quando o projeto das placas solares é feito para uma residência, é executado primeiramente um levantamento de carga e consumo, de modo que o número de placas utilizadas seja suficiente para gerar uma quantidade de energia propositalmente maior do que o consumo.

O excedente de energia é devolvido à rede de distribuição. Este valor é estimado na prática através de um medidor bidirecional, como pode ser visto na figura a seguir:

Figura 10: Esquema de um sistema fotovoltaico em uma residência



Fonte: Projeto elétrico RGB Energia, 2023 (Anexo A).

5. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa foi possível compreender a importância da eficiência e conservação de energia e um sistema fotovoltaico. Foram identificados os fatores que afetam a eficiência de um sistema fotovoltaicos e identificados os processos relativos à conservação de energia tanto na etapa de conversão da energia solar em energia elétrica quanto na etapa de consumo e descarregamento do excedente para a rede de distribuição.

Durante a pesquisa identificou-se como grandezas Matemáticas e Físicas relevantes para o estudo as seguintes: Irradiação solar mensal, área total das placas, tempo de exposição ao sol e potência do sistema fotovoltaico. Com esses dados foram calculadas a energia total luminosa, a energia elétrica gerada pelas placas solares e a eficiência do sistema fotovoltaico.

Todos esses cálculos foram realizados para uma residência na cidade de Macapá- AP equipada com painéis solares considerando o ano de 2024. Confirmou-se a hipótese de que a eficiência real do sistema é menor do que a nominal (fornecida pelo fabricante). Confirmou-se, ainda, que fatores como chuvas, sombreamento e poeira podem afetar a eficiência do sistema e identificou-se ainda outro fator, a temperatura.

Por fim foi possível analisar o princípio de conservação de energia envolvido no sistema fotovoltaico. Na etapa de conversão da energia solar em energia elétrica verificou-se que a fração não convertida de energia é perdida para o ambiente através dos processos de reflexão na superfície da placa e de absorção que converte a energia luminosa em calor.

Já etapa de consumo de energia pela residência verificou-se que há uma perda natural devido ao efeito Joule nos fios e componentes elétricos da instalação residencial, e o excedente de energia é descarregado na rede de distribuição através de um medidor bidirecional. No sistema estudado não há armazenamento do excedente por não ser um sistema que faz uso de baterias.

Este estudo contribui tanto para quem trabalha diretamente com a fabricação, comercialização, instalação e manutenção de sistema fotovoltaicos quanto para profissionais de ensino que desejam aplicar princípios físicos e matemáticos em um contexto atual e relevante como são as energias renováveis.

REFERÊNCIAS

[1] ASHRAE Handbook – HVAC Applications. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2019.

[2] BRAGA, R. P. Energia solar fotovoltaica: fundamentos e aplicações. Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola Politécnica Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro, RJ. 2008.

[3] CLIMATEMPO, 2024. Climatologia e histórico de previsão do tempo em Macapá, BR. Disponível em: www.climatempo.com.br/climatologia/39/macapa-ap. Acesso em: 25/01/2025.

[4] COSTA, M. A. F. da; COSTA, Mª. de F. B. da. Metodologia da pesquisa: conceitos e técnicas. 2ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009.

[5] CRESESB- Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br/index.php#data>. Acesso em: 14 abr. 2024.

[6] DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4ª ed. New York: Wiley, 2013.

[7] GIL, A. C. et al. Como elaborar projetos de pesquisa. 4ed. 10 reimpr. São Paulo: Atlas, 2007.

[8] GREEN, M. A. Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. Englewood

Cliffs: Prentice-Hall, 1982.

[9] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. Mecânica. v.1. 10ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016 a.

[10] _____. Fundamentos de Física. Ondas e Termodinâmica. v.2. 10ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016 b.

[11] _____. Fundamentos de Física. Eletromagnetismo. v.3. 10ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016 c.

[12] IEC 60904-3: Photovoltaic Devices – Measurement Principles for Terrestrial Photovoltaic (PV) Solar Devices with Reference Spectral Irradiance Data. International Electrotechnical Commission, 2019.

[13] IEEE Std 1562-2021: Guide for Optimizing the Performance and Life of Photovoltaic (PV) Arrays. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021

[14] KALOGIROU, S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2ª ed. Oxford: Academic Press, 2013.

[15] LANA, Luana Teixeira Costa et al. Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica. Engenharias On-line, v. 1, n. 2, p. 21-33, 2015.

[16] MARQUES, D. D. et al. Variação da radiação solar no estado do Amapá: estudo de caso em Macapá, Pacuí, Serra do Navio e Oiapoque no período de 2006 a 2008. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 27, p. 127-138, 2012.

[17] MOSQUEIRA, G. L. de A. A evolução da energia solar fotovoltaica no Brasil. Monografia apresentada à Escola de Administração da Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO) para obtenção do título de Bacharel em Administração Pública. Rio de Janeiro, RJ, 2020.

[18] MOURA, H. P. et al. Estimativa da radiação solar global média mensal em função da amplitude térmica do ar para a cidade de Macapá – AP. Revista Brasileira de Energia Solar - Ano 15 - Volume XV - Número 2 - Dezembro de 2024 - p. 93 – 99

[19] NASCIMENTO, R. S. do; ALVES, G. M. Fontes alternativas e renováveis de energia no Brasil: Métodos e benefícios ambientais. XX Encontro Latino-Americano de Iniciação Científica, XVI Encontro Latino-Americano de Pós-Graduação e VI Encontro de Iniciação à Docência–Universidade do Vale do Paraíba, 2016.

[20] NUSSENZVEIG, M. Conservação da Energia. São Paulo: Blucher, 2018.

[21] PEREIRA, M.; RÜTHER, R. Energía solar fotovoltaica. Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 3, 2011.

[22] PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. (Orgs.) Manual de Engenharia para Sistema Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar GTES – CEPEL – DTE – CRESEB. Rio de Janeiro 2014

[23] RUDIO, F. V. Introdução ao projeto de pesquisa científica. Petrópolis: Vozes, 1982.

[24] SEABRA, G. de F. Pesquisa científica: o método em questão. Brasília: Edunb, 2001.

[25] SEARWAY, R. A.; JEWETT, J. W. Physics for Scientists and Engineers. 9ª ed. Boston: Cengage Learning, 2018.

[26] SENAI. Sistemas Fotovoltaicos – Montador. Série Energia. 2023a.

[27] SENAI. Sistemas Fotovoltaicos – Instalador e Projetista. Série Energia. 2023b.

[28] VEJA. O avanço da energia gerada por painéis solares no Brasil. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/agenda-verde/o-avanco-da-energia-gerada-por-paineis-fotovoltaicos-no-brasil-e-no-mundo/>. Acesso em: 2 ago. 2024.

Capítulo 2

Análise do consumo de energia elétrica em batedeiras de açaí em Macapá-AP para estudo de viabilidade econômica da implantação de energia fotovoltaica

Edson Alves Oliveira
Joana D'arc Maurício Rocha
Cleyson Santos de Paiva
Gerson Anderson de Carvalho Lopes

Resumo: O açaí é um dos produtos mais consumidos pela população da região Amazônica. A transformação do fruto em bebida ocorre nas unidades artesanais conhecidas como batedeiras ou "amassadeiras" de açaí. Além das questões de higiene relativas ao manuseio, acomodação do fruto e à produção do açaí batido para ser comercializado, que são importantes para garantir a saúde do produtor e do consumidor, também são importantes as questões energéticas relativas à produção do açaí, que podem impactar de maneira significativa o custo de operação do empreendimento. Sendo assim, o objetivo geral desse trabalho foi o de avaliar a potencialidade de implementação de sistema fotovoltaico em batedeiras de açaí em Macapá. Essa potencialidade foi estudada de forma exploratória através da aplicação de questionários onde foram levantados dados necessários para a obtenção de resultados tangíveis. A partir dos dados foi possível ter resultados como distribuição geográfica das batedeiras, custos de implementação por batedeira e tempos de retorno do investimento potencial em sistemas fotovoltaicos. Dessa forma conclui-se que a viabilidade da instalação de sistemas fotovoltaicos em batedeiras depende de vários fatores e do ambiente económico social constituído na época do estudo de viabilidade, bem como as capacidades financeiras e interesses individuais de cada proprietário.

Palavras-chave: viabilidade, energia fotovoltaica, batedeiras de açaí, economia amapaense.

1. INTRODUÇÃO

O açaí é uma das matérias primas mais importantes da região amazônica, consumido em larga escala por todas as faixas etárias, desde crianças até idosos, devido às suas notáveis propriedades nutricionais e funcionais. Os frutos da espécie *Euterpe oleracea*, conhecidos por diversos nomes populares, como açaí comum, juçara e açaí-do-Pará, são a parte economicamente relevante da planta, amplamente utilizados na extração de sua polpa (Bezerra, 2011).

No entanto, a produção de açaí enfrenta desafios, especialmente no que diz respeito à sua transformação em bebida nas unidades artesanais, conhecidas como batedeiras ou 'amassadeiras' de açaí. Além das questões de higiene que são importantes para garantir a saúde do produtor e do consumidor, a produção enfrenta desafios relacionados ao custo de energia elétrica, que desempenha um papel significativo no preço final do produto.

Nesse contexto, a integração da energia solar nas batedeiras de açaí emerge como uma solução promissora para enfrentar esses desafios. A adoção de sistemas de energia solar pode não apenas reduzir os custos operacionais associados ao consumo de energia elétrica, mas também contribuir para a sustentabilidade ambiental.

A geração de energia solar fotovoltaica é um processo que utiliza painéis solares para converter a luz solar em eletricidade. Esses painéis são compostos por células fotovoltaicas que absorvem a luz solar e a transformam diretamente em corrente elétrica, sem a necessidade de partes móveis ou combustíveis. Esse método de geração de energia é limpo, renovável e cada vez mais acessível, a energia solar fotovoltaica pode ser instalada em uma variedade de locais, desde residências e empresas até grandes usinas solares, tornando-se uma opção versátil para atender às crescentes demandas por eletricidade (Grimoni, 2019).

A pesquisa operacional é uma abordagem analítica que utiliza técnicas matemáticas e estatísticas para tomar decisões eficientes em organizações e processos complexos. Seu objetivo é maximizar o desempenho e a eficiência dos sistemas, otimizando o uso de recursos limitados, como tempo, dinheiro e materiais. Essa pode ser uma ferramenta capaz de criar um modelo para análise de viabilidade da instalação dos sistemas fotovoltaicos em batedeiras de açaí. Através da aplicação de técnicas de pesquisa operacional, é possível analisar a viabilidade, considerando variáveis como o tamanho e capacidade das instalações, a demanda sazonal pelo produto e a eficiência dos sistemas de energia solar. Isso permite não apenas reduzir os custos operacionais, mas também maximizar a eficiência do processo produtivo, aumentando a competitividade do negócio de açaí (Fogliatto, 2024).

1.1. PROBLEMA DE PESQUISA

Na região do estado do Amapá, o processo de coleta de açaí é realizado de forma artesanal. Os frutos são cuidadosamente colhidos manualmente das palmeiras e, em seguida, embalados em sacas para transporte. Essas sacas são então levadas para unidades de processamento, tanto para exportação quanto para venda em feiras locais e portos destinados ao consumo interno. Nos pontos de destino, os frutos são adquiridos por proprietários de "batedeiras de açaí" ou "amassadeiras de açaí", onde são transformados principalmente em polpa de açaí de consistência pastosa/líquida (Martinelli et al, 2015).

Com o avanço tecnológico, o processo de produção da polpa de açaí também evoluiu significativamente. No começo era realizado de forma rudimentar, com técnicas manuais de despolpamento da fruta; posteriormente esse processo passou a utilizar equipamentos eletromecânicos conhecidos como despolpadores. Esses equipamentos não apenas agilizam o processo de obtenção da polpa de açaí, mas também proporcionam maior eficiência e eficácia na produção da polpa (Bezerra, 2011).

O aumento da eficiência na produção, impulsionado pelo uso de equipamentos modernos, levou os produtores de açaí a enfrentarem um desafio inesperado: o excesso momentâneo do produto final in natura para atender aos horários de pico de demanda, como o horário de almoço (entre 11 horas da manhã e as 13 horas da tarde). Simultaneamente, a introdução dos despolpadores na produção de polpa de açaí trouxe consigo uma nova demanda: a energia elétrica. A necessidade de eletricidade para o funcionamento desses equipamentos adicionou um novo elemento ao processo produtivo, resultando em custos operacionais mais altos e potencialmente impactando na viabilidade econômica e competitividade do negócio.

Entretanto, para lidar com o excesso de produção, tornou-se essencial garantir a conservação adequada do produto para preservar suas propriedades características, como cor, odor e sabor, por mais tempo. Isso demandou a adoção de refrigeradores, que também dependem de energia elétrica para funcionar, aumentando ainda mais o consumo desse recurso.

Diante desse cenário, surge uma problemática: como lidar com o aumento significativo do consumo de energia elétrica na produção de polpa de açaí, ocasionado pela utilização de despolpadores e refrigeradores, sem comprometer a viabilidade econômica do negócio? Essa questão torna-se premente, uma vez que o uso desses equipamentos modernos é essencial para otimizar a produção, porém, o aumento nos custos operacionais e a crescente demanda por energia elétrica representam desafios importantes.

1.2. JUSTIFICATIVA

A elaboração desta pesquisa se justifica diante do cenário apresentado, onde a utilização de equipamentos para processamento e conservação da polpa de açaí, dependentes de energia elétrica, torna-se um fator determinante para a viabilidade econômica e a competitividade das batedeiras de açaí. E ainda considerando que o custo do kWh no estado do Amapá é em média de 72 centavos (sem impostos e encargos) (Equatorial, 2024), e prevê-se um aumento de cerca de 44% nesse valor em um futuro próximo (G1 Amapá, 2024), a busca por soluções para reduzir o custo do consumo de energia elétrica na produção de polpa de açaí torna-se ainda mais urgente.

Portanto, este estudo propõe-se a investigar estratégias e soluções para minimizar o impacto do aumento do custo da energia elétrica, visando garantir a sustentabilidade econômica dos proprietários de batedeiras de açaí no estado do Amapá, com enfoque na capital, cidade de Macapá.

Uma possível solução para mitigar o custo de consumo de energia elétrica na produção de açaí é a adoção de equipamentos mais eficientes do ponto de vista energético, como equipamentos de processamento e refrigeração com classificação energética A ou superior. No entanto, uma medida mais abrangente e sustentável seria a implementação de sistemas fotovoltaicos para geração de energia elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos são capazes de converter a luz solar em eletricidade de forma limpa e renovável. Existem duas principais configurações de sistemas fotovoltaicos: *on grid* e *off grid*. Um sistema fotovoltaico *on grid* é conectado à rede elétrica convencional. A energia gerada pelos painéis solares é utilizada localmente podendo suprir as demandas de energia da produção de açaí, e o excedente é injetado na rede elétrica, gerando créditos energéticos que podem ser utilizados posteriormente, quando a demanda local for maior do que a geração solar.

Já um sistema fotovoltaico *off grid* é independente da rede elétrica convencional. A energia gerada pelos painéis solares é armazenada em baterias e utilizada localmente para suprir as demandas de energia da produção de açaí, mesmo durante períodos sem irradiação solar. Esse tipo de sistema é especialmente útil em áreas remotas onde não há acesso à rede elétrica.

Em conclusão, a implementação de sistemas de geração de energia fotovoltaica apresenta-se como uma solução promissora para mitigar os custos de consumo de energia elétrica na produção de polpa açaí. No entanto, a real necessidade e aplicabilidade desses sistemas dependem de estudos de viabilidade detalhados. Esses estudos irão determinar qual porte do sistema é mais adequado para as necessidades específicas de cada batedeira de açaí, levando em consideração fatores como as condições de irradiação solar, o consumo, a demanda energética e os recursos financeiros disponíveis. Além disso, esses estudos também irão definir a quantidade de painéis solares e demais equipamentos necessários para o funcionamento eficiente desses sistemas. Assim, é possível dar os primeiros passos para o estudo da implementação de sistemas de geração de energia alternativa na produção de polpa de açaí, que contribuam para a redução dos custos operacionais e para a sustentabilidade econômica das batedeiras de açaí (Portal Solar, 2024).

1.3. OBJETIVOS

Dessa forma, este estudo tem por objetivo avaliar o uso da energia solar e a aplicação de técnicas de pesquisa operacional na produção de açaí, visando garantir sua viabilidade econômica e sustentabilidade a longo prazo. Ao analisar o potencial das energias renováveis, como a solar, e empregar métodos analíticos, como a pesquisa operacional, busca-se não apenas a redução dos custos operacionais das batedeiras de açaí, mas também o alinhamento com os princípios de sustentabilidade ambiental. Essa sinergia entre eficiência econômica e responsabilidade ambiental não só fortalecerá a competitividade do setor de produção de açaí, mas também promoverá o bem-estar das comunidades amazônicas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O AÇAÍ

O açaizeiro (Euterpe oleracea, Mart) é uma espécie característica da região Norte do Brasil, pertencente à família das Aceráceas (Costa; Oliveira, 2019). Seus frutos são pequenos, arredondados e possuem uma coloração roxo-escuro devido à presença de pigmentos naturais. A parte comestível do fruto apresenta um valor calórico de 262 kcal/100g. Além de ser uma fonte energética, a polpa de açaí é rica em minerais, como potássio, cálcio, fósforo, magnésio e ferro, além de conter vitaminas E e B1. Historicamente, o fruto do açaí era consumido na forma de "vinho" até o final do século

XX, sendo considerado um alimento básico pelas populações ribeirinhas e de baixa renda. Era frequentemente acompanhado de farinha de mandioca, peixe e outros alimentos. A produção de açaí era predominantemente extrativista, voltada principalmente para o consumo doméstico, com uma comercialização limitada do excedente. (Armando, 2015).

2.2. A PRODUÇÃO MANUAL DA POLPA DE AÇAÍ

Parte da limitação da comercialização da polpa de açaí decorria da falta inicial de mercados consumidores, bem como do processo de obtenção da polpa, que era realizado de maneira manual e pouco eficiente. Para isso, eram empregadas duas técnicas principais: a exposição ao sol e a imersão em água quente (Maués, 2019).

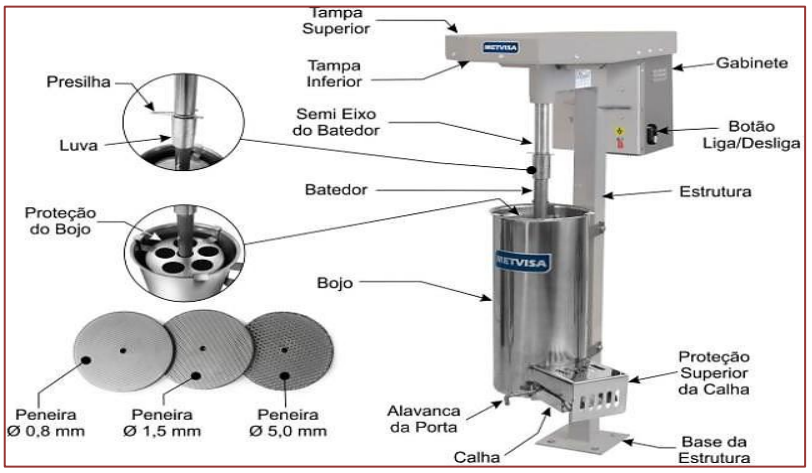
Na primeira abordagem, os frutos eram dispostos em recipientes rasos e deixados ao sol até que a polpa começasse a se desprender dos caroços ao toque. Já na segunda técnica, os caroços eram mergulhados em água aquecida, permanecendo em imersão até que a polpa amolecesse o suficiente para ser extraída. Uma vez que a polpa estivesse amolecida, porém ainda aderida aos caroços, os frutos eram transferidos para recipientes apropriados, que podiam variar em formato. Nessa fase, o processo de separação da polpa dos caroços era realizado manualmente, utilizando-se as mãos ou um pilão. Após a separação dos caroços, a polpa era espremida através de uma peneira, com o objetivo de extrair o máximo de polpa possível, preservando assim seu sabor e textura característicos (Bezerra, 2011).

2.3. PRODUÇÃO MECANIZADA DE POLPA DE AÇAÍ

A popularização do açaí nos últimos anos resultou em uma crescente demanda por sua polpa, tanto no mercado interno quanto no internacional. O aumento da popularidade dessa fruta, impulsionado pelos seus reconhecidos benefícios para a saúde e pelo seu sabor único, gerou uma necessidade urgente de aumentar a eficiência e a eficácia da produção. Anteriormente, a produção artesanal da polpa de açaí exigia um processo manual intensivo, especialmente na etapa de despendimento dos caroços. Esse processo era notoriamente lento e trabalhoso, o que limitava a capacidade de atender à crescente demanda (Bezerra, 2011).

Para enfrentar esse desafio e reduzir o tempo do processo, surgiram os maquinários conhecidos popularmente como "batedeiras de açaí" e tecnicamente como "despolpadoras". Essas máquinas foram desenvolvidas para automatizar e agilizar o processo de despendimento dos caroços, possibilitando uma produção em larga escala de polpa de açaí de forma mais rápida e eficiente. Com isso, tornou-se viável atender à demanda crescente de maneira mais eficaz, proporcionando uma resposta adequada ao mercado em constante expansão. (Bezerra, 2011).

Figura 1 - Despolpadora de Açaí em detalhes



Fonte: BIMG Metvisa (2022).

Conforme ilustrado na Figura 1, o equipamento industrial destinado ao despolpamento do açaí é composto por uma variedade de sistemas eletromecânicos que combinam as funções de despolpar e filtrar a polpa do açaí (eixo batedor, e peneiras), resultando na entrega do produto final pronto para o consumo ao consumidor. Para desempenhar essa função, esses equipamentos requerem energia cinética, a qual é fornecida por um eixo conectado a um motor elétrico. Na configuração apresentada na Figura 1, estima-se que esse motor tenha uma potência de 1 kW (BIMG METVISA, 2022).

2.4. MERCADO DA POLPA DO AÇAÍ NO BRASIL E NO AMAPÁ

O Brasil se posiciona como o maior produtor, consumidor e exportador de polpa de açaí. Entre os estados produtores de açaí estão o Pará, Maranhão, Amapá, Acre e Rondônia, sendo o estado do Pará, responsável por 95% da produção de açaí, calculada em 100 a 180 mil litros/ dia em Belém. A safra do açaí vai de agosto a dezembro no Pará e no estuário amazônico o pico da safra ocorre no período de julho/agosto (Martinelli, Pereira, Darlan, 2015). O Amapá é o quinto maior produtor do açaí brasileiro (IBGE, 2019).

No do estado do Amapá, a indústria exportadora só consegue competir com o mercado local quando o preço do açaí cai a valores de até R$ 50,00 por saco do fruto (saco de 50 kg). O mercado local, por sua vez, consegue absorver um aumento no preço do produto no período de escassez de até R$ 200,00 por saco (Carvalho, Costa, Segovia, 2017).

O mercado do fruto e a valorização da cultura do açaí tem se expandido e, com isso, a comercialização se estendendo para todas as regiões do Brasil e para o exterior, sendo importante fonte de renda (Costa, Oliveira, 2019). O aumento da produção de açaí a cada ano é resultante da expansão do mercado que o fruto vem alcançando, contribuindo com os aspectos econômicos (Araújo, Araújo, 2020).

No ano de 2013 os atravessadores foram responsáveis por renda bruta de R$ 15,08 milhões na comercialização do açaí. Os atravessadores adquiriram o fruto junto aos produtores por R$ 11,06 milhões e foi incrementado no repasse do produto um valor de R$ 4,02 milhões (IPEA, 2015).

Com o aumento da demanda o produto vem se tornando escasso e consequentemente com isto ocorre à elevação dos preços ao consumidor local, isso ocorre principalmente no período da entressafra, de janeiro a junho (Nogueira et al., 2005).

A variação do preço se dá, também, pela fenologia da planta, já que existem variações entre as diferentes regiões produtoras quanto ao período de produção de frutos. A safra do açaí no estado do Amapá coincide com o período chuvoso (Carvalho, Costa, Segovia, 2017). Como as batedeiras não conseguem repassar o aumento do preço para seus clientes - que simplesmente deixam de adquirir o produto ou diminuem drasticamente o consumo se o preço sobe – essas batedeiras se veem obrigadas a fechar até que o valor da saca torne rentável novamente para processar o açaí. Nenhuma batedeira de açaí, seja ela de safra ou não, faz estoque do produto, devido ao fruto ser muito perecível (Armando, 2015).

2.5. BATEDEIRAS DE AÇAÍ E A GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A energia solar tem se destacado como uma excelente opção para os residentes do Amapá e os estabelecimentos comerciais, devido à posição geográfica privilegiada sobre a linha do equador, que proporciona uma alta exposição solar diária, mesmo com os índices pluviométricos anuais elevados. Além disso, a precariedade e os altos preços dos serviços de distribuição elétrica no estado tornam a energia solar uma alternativa atrativa.

A integração de energia solar nas batedeiras de açaí ofereceria benefícios significativos tanto para o meio ambiente, por se tratar de uma fonte de energia renovável, quanto para a economia a longo prazo, devido aos altos custos associados ao consumo de energia elétrica. Embora a instalação de placas solares em sistemas o*n grid* nas batedeiras de açaí não seja uma prática nova, os profissionais que trabalham nessas batedeiras muitas vezes não dispõem dos recursos necessários para custear essa instalação, ou não recebe todos os esclarecimentos necessários para compreender completamente os benefícios potenciais desse investimento (Creão, 2021).

Para analisar a otimização do consumo de energia elétrica no processamento do açaí, é fundamental considerar as etapas de sua preparação. Após as etapas de recepção dos frutos, seleção e pré-lavagem, os frutos do açaí passam por diversas etapas, incluindo amolecimento, lavagem, extração da polpa e conservação (Santos Filho, 2015). Em todas as etapas após a pré-lavagem que utilizem energia elétrica, poderiam ser suplementadas com energia solar o que poderia ocasionar um uma importante redução dos custos operacionais.

2.6. GERAÇÃO FOTOVOLTAICA *ON GRID*

A energia fotovoltaica é uma forma de energia renovável obtida a partir da conversão direta da luz solar em eletricidade. Ela é produzida por células fotovoltaicas, geralmente feitas de silício, que capturam a energia dos fótons da luz solar e a transformam em corrente elétrica, por meio de inversores de frequência, a energia gerada pode ser tanto completamente consumida pelo estabelecimento ou residência ou o excesso de geração ser injetado na rede para posterior compensação em contas de consumo de energia elétrica futuras; a instalação de sistema *on grid* ligado à rede da concessionária podem ser capazes de diminuir a conta de consumo de energia elétrica em até 95 por cento, sendo o valor não subtraído compostos por impostos encargos e taxas, de maneira geral esses

sistemas por ter um alto custo de aquisição tendem a ser adquiridos por meio de financiamentos onde as taxas cobradas pelas empresas financiadoras variam de 1,5 a 2 % ao mês sobre o montante contratado, os valores dependem de análise financeira separada de cada indivíduo e os prazos de financiamento podem variar de 60, 84 e 96 meses (Raimundo, 2020).

No sistema fotovoltaico *on grid,* os principais componentes são:

a) Painéis Fotovoltaicos: São compostos por células fotovoltaicas agrupadas em módulos para captar a luz solar e gerar eletricidade.

b) Inversor: Responsável por converter a corrente contínua (CC) gerada pelos painéis em corrente alternada (CA), que é utilizada na maioria dos aparelhos e dispositivos elétricos.

c) Estrutura de Suporte: Suporte físico para os painéis fotovoltaicos, garantindo sua instalação e fixação adequadas.

d) Cabeamento e Dispositivos de Proteção: Cabos elétricos, conectores e dispositivos de proteção elétrica para garantir a segurança e eficiência do sistema (Grimoni, 2019).

2.7. A PESQUISA OPERACIONAL

A Pesquisa Operacional tem suas raízes no período da Segunda Guerra Mundial, quando foi desenvolvida para resolver problemas militares complexos, como alocação de recursos, logística e planejamento de operações. Após a guerra, a metodologia foi adotada por empresas e organizações para otimizar processos e tomar decisões mais eficientes. A Pesquisa Operacional utiliza técnicas matemáticas, estatísticas e computacionais para modelar e analisar sistemas complexos, identificando padrões, tendências e soluções ótimas. Ela é aplicada em diversas áreas, incluindo logística, produção, marketing, finanças, saúde e transporte (Lopes, Galvão, 2010).

No cenário empresarial atual, a Pesquisa Operacional é uma ferramenta preciosa na análise de investimentos para a redução de custos a longo prazo. Ao utilizar técnicas analíticas específicas, como modelos matemáticos, ela capacita as empresas a identificarem oportunidades estratégicas para otimizar processos e operações. Isso resulta no potencial redução dos custos operacionais ao longo do tempo, permitindo um aumento de competitividade em relação aos concorrentes do setor. Além disso, proporciona uma maior segurança quanto à viabilidade financeira da empresa (Fogliatto, 2024).

3. METODOLOGIA

A pesquisa adotou uma abordagem exploratória e qualitativa. Yin (1998) destaca que a pesquisa qualitativa se baseia em duas condições específicas que não são necessariamente compartilhadas pelo estudo de caso: a observação detalhada e próxima do mundo natural pelo pesquisador, e a tentativa de evitar qualquer viés em relação a algum modelo teórico. Por outro lado, Kirk e Miller (1986) ressaltam que a pesquisa qualitativa visa identificar a presença ou ausência de certos aspectos no contexto investigado, em contraste com a abordagem quantitativa, que se concentra na mensuração do grau em que um fenômeno

ocorre. Assim, a pesquisa qualitativa prioriza o trabalho de campo em vez da mera coleta de dados numéricos.

Quanto à elaboração de questionários, Aaker et al. (2001) consideram-na uma "arte imperfeita", já que não há procedimentos precisos que garantam a eficácia dos objetivos de medição. O autor enfatiza que o uso do bom senso e a experiência do pesquisador podem ajudar a minimizar diversos tipos de erros, como questões ambíguas, que podem distorcer os resultados. Por sua vez, Parasuraman (1991) destaca que um questionário é, fundamentalmente, um conjunto de perguntas elaboradas para coletar os dados necessários para alcançar os objetivos do projeto. Embora nem todos os projetos de pesquisa adotem essa abordagem de coleta de dados, o questionário desempenha um papel crucial na pesquisa científica, especialmente nas áreas das ciências sociais.

3.1. ÁREA DE ESTUDO: MUNICÍPIO DE MACAPÁ

Localizada na Região Norte do Brasil, Macapá é a capital do estado do Amapá, com uma população estimada em mais de 500 mil habitantes. A economia da cidade é impulsionada por diversos setores, destacando-se o comércio e o turismo, bem como o processamento e comercialização do açaí, juntamente com o município vizinho de Santana. Segundo pesquisa desenvolvida por Carvalho et al. (2017), em 2010, o açaí movimentava cerca de meio bilhão de reais na economia do Amapá. Naquela época, apenas nos municípios de Macapá e Santana, existiam cerca de 2000 estabelecimentos de processamento de açaí, conhecidos como "batedeiras". No ano de 2020, esse número estimado subiu para 5000 estabelecimentos, segundo informações não oficiais de representantes do segmento (Euler, 2020). Vale ressaltar que devido à informalidade no setor, os números podem não refletir completamente a realidade do setor, e estima-se que entre 25.000 e 30.000 pessoas estejam diretamente envolvidas na cadeia produtiva do açaí nessas regiões.

3.2. COLETA DE DADOS

A coleta de dados para este estudo foi conduzida por meio de questionários online, A ordem das perguntas, bem como o conteúdo delas, podem ser visualizadas no Apêndice A. O questionário foi disponibilizado aos proprietários pela plataforma *Google Forms.* Após a aplicação dos questionários, foi realizado o tratamento estatístico e a geração dos gráficos presentes nos resultados do trabalho, as perguntas foram elaboradas seguindo uma sequência lógica de etapas embasadas por Aaker et al (2001). Inicialmente, houve um planejamento detalhado para determinar o que seria mensurado, com a definição clara dos objetivos específicos da pesquisa. Em seguida, as perguntas foram formuladas cuidadosamente para garantir a obtenção das informações relevantes para o estudo. Durante a elaboração do questionário, foi dedicada atenção à definição do texto e à ordem das perguntas, visando assegurar a clareza e eficácia na coleta de dados. Os questionários foram distribuídos e preenchidos por 10 estabelecimentos de processamento e venda de açaí, conhecidos como "batedeiras", os critérios escolhidos para a definição das batedeiras a serem pesquisadas foram: a sua localização (as batedeiras que foram pesquisadas tinham que ser as mais espaçadas geograficamente dentro dos limites do município de Macapá), e quanto ao seu porte, procurando pesquisar batedeiras de pequeno , médio e grande porte, com o uso desses critérios foi possível abarcar uma variedade de realidade de funcionamento de batedeiras de açaí.

3.3. TRATAMENTO DOS DADOS

Com a aplicação do questionário elaborado pelo autor, foram captados dados como localização, tempo de operação da batedeira de açaí, litros de polpa de açaí vendidos em média por dia. Tais dados foram compilados para melhor entendimento. Por questões de privacidade, o nome dos estabelecimentos, de seus proprietários bem como o endereço completo foram omitidos. Sendo assim as batedeiras que foram apresentadas em quadros nesse trabalho apresentavam uma nomenclatura de acordo com ordem alfabética A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, formando um conjunto com 10. A nomenclatura a ser utilizada será o nome (batedeira de açaí no início seguido de uma letra, por exemplo: Batedeira de Açaí A.

3.4. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para se definir a viabilidade o sistema proposto um dos principais itens a serem abordados foi o dimensionamento do sistema fotovoltaico, onde através de cálculos e considerações técnicas foi possível dimensionar um sistema que seja compatível com as necessidades do consumidor. O dimensionamento pode ser calculado segundo a equação (1).

Definição da Potência Teórica do Sistema Fotovoltaico

$$Pfv = \frac{C}{Irr} * F \qquad (1)$$

Onde:

- Pfv = Potência do Sistema em kWp (quilo-quatt-pico)
- C = Consumo anual de energia kWh/ano (quilo-watt-hora/ano)
- Irr = Radiação solar local (kWh/m^2/ano)
- F = Fator de performance do sistema (85%).

Com a potência do sistema calculada é possível definir quantas placas esse sistema irá utilizar através da equação (2)

$$Qp = \frac{PFV}{PP} \qquad (2)$$

Onde:

- Qp = Quantidade de placas;
- Pfv = Potência do Sistema (kWp);
- Pp = Potência das placas fotovoltaicas (Wp) (Solenerg Engenharia, 2016).

A seleção do inversor deve atender a vários parâmetros específicos, incluindo a tensão de operação desejada pelo cliente (127V, 220V, 380V), bem como o número de fases necessárias para a instalação (monofásico, bifásico, trifásico). Além disso, a potência do inversor deve ser dimensionada para ser de até 25% inferior à potência total dos painéis solares instalados. É possível utilizar mais de um inversor, dependendo das necessidades e das características do sistema (Raimundo, 2020).

A instalação de sistemas fotovoltaicos requer a montagem adequada das estruturas de fixação das placas solares, sendo fundamental para a segurança e eficiência do sistema. O tipo de telhado onde serão instaladas as placas, como fibrocimento, metálico ou lajes, influencia diretamente no custo e na complexidade das estruturas. Telhados de

fibrocimento geralmente demandam estruturas mais simples, enquanto telhados metálicos podem exigir fixações específicas. Já para telhados de lajes, as estruturas precisam ser mais robustas (Raimundo, 2020).

3.5. LEVANTAMENTO DOS CUSTOS MÉDIOS

A componente fundamental em um estudo de viabilidade e o levantamento dos custos de um possível empreendimento ou investimento, utilizando como base os dados levantados por Raimundo (2020) foi possível ter uma base dos custos médios de um sistema fotovoltaico, abrangendo o custo das placas, do inversor e da instalação. Custos adicionais, como acessórios, elementos de proteção, ligação e homologação dos sistemas, já estão inclusos nos valores médios, uma vez que as empresas de energia solar costumam embutir esses custos na venda e instalação dos equipamentos, bem como foi possível verificar os valores médios de taxa de juros mensais praticadas em financiamentos sendo arbitrado a taxa média de 1,5% ao mês. Os valores encontrados de custos médios encontram-se estão no APÊNDICE B, os valores médios no levantamento do custo dos inversores foram os menores valores referente a cada intervalo.

3.6. ANÁLISE DOS DADOS UTILIZANDO PESQUISA OPERACIONAL

Os dados coletados foram submetidos a uma análise utilizando as técnicas de Pesquisa Operacional. Por meio dessa análise, foi possível desenvolver um modelo matemático que estabelece a relação entre os dados obtidos com a aplicação do questionário o custo total de aquisição do sistema fotovoltaico, as opções de pagamento por meio de financiamento e o tempo estimado para o retorno do investimento. Essa abordagem analítica permite uma compreensão mais aprofundada dos aspectos financeiros envolvidos na implementação de sistemas fotovoltaicos e facilita a tomada de decisões estratégicas.

Para desenvolvimento do trabalho foi utilizado uma ferramenta online para análise do financiamento, devido a limitações da definição de uma fórmula especifica e adequada para análise de financiamento de sistemas fotovoltaicos, se utilizou a ferramenta online disponível no site iDinheiro (2024) utilizada para financiamento de veículos, a estrutura da ferramenta online pode ser observada na Figura 2.

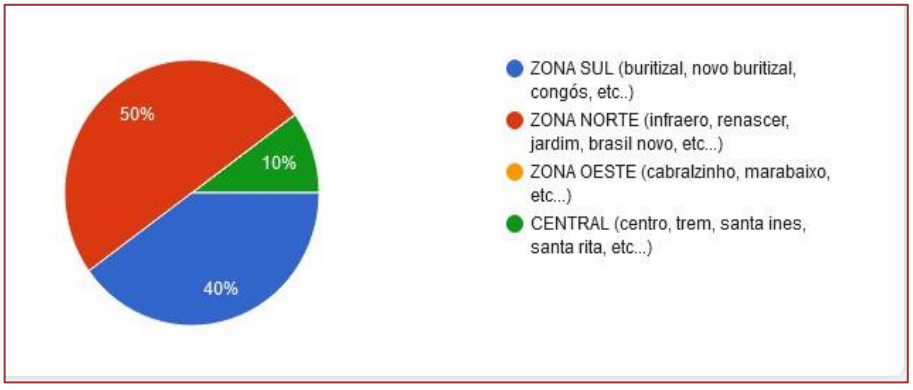
Figura 2 - Ferramenta online para simulação de financiamentos

Fonte: IDinheiro (2024)

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos dados coletados utilizando as ferramentas descritas na metodologia foram gerados os seguintes resultados.

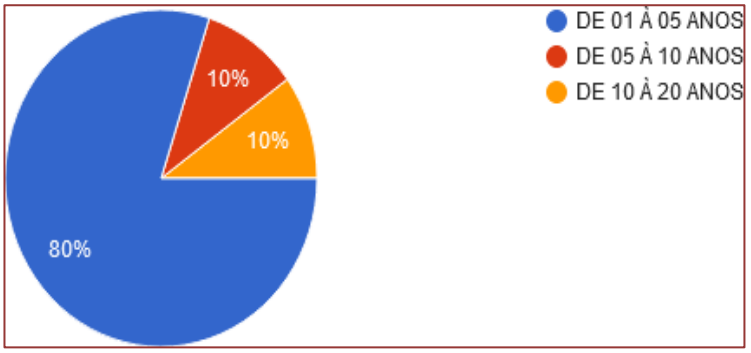
Figura 3 - Disposição geográfica das batedeiras de açaí por zona em Macapá



Fonte: os autores.

Neste estudo, foram analisados estabelecimentos com diferentes localizações na cidade de Macapá, que foram classificados conforme a zona em que se encontram (Figura 3), temos a disposição geográfica das batedeiras de açaí por zonas no município de Macapá.

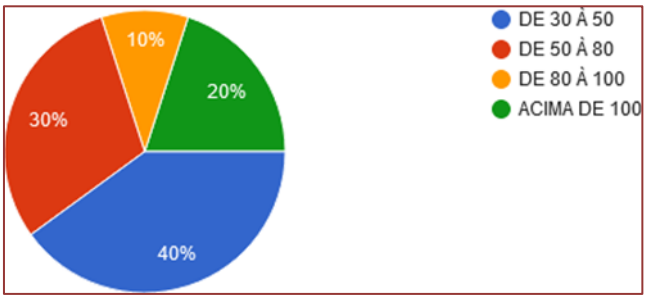
Figura 4 - Tempo de operação da batedeira de açaí



Fonte: os autores.

A partir do gráfico presente na Figura 4 é possível observar que a maior parte das batedeiras de açaí pesquisadas são relativamente novas no mercado, possuindo somente de 1 a 5 em funcionamento; (80%) os outros 20% por cento com empresas de 5 a 20 anos atuando na área.

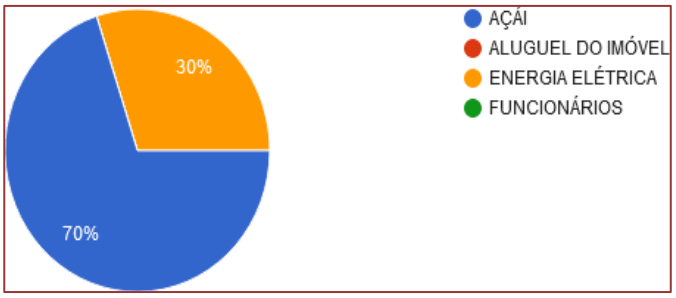
Figura 5 - Média diária de venda das batedeiras estudadas (em litros) durante a safra (2023)



Fonte: os autores.

Como visto na Figura 5, a quantidade de produção de uma batedeira varia bastante. Isso se dá principalmente em relação ao seu porte (quantidade de pessoal, quantidade de despolpadoras, equipamentos de conservação como *freezer*), bem como o conhecimento adquirido pelo empreendedor do seu público-alvo, produzindo somente o que costuma vender, o açaí também costuma variar de preço de acordo com a quantidade de água presente no mesmo, sendo dividido em açaí comum vendido de 10 a 15 reais e açaí especial (grosso) vendido de 20 a 25 reais o litro.

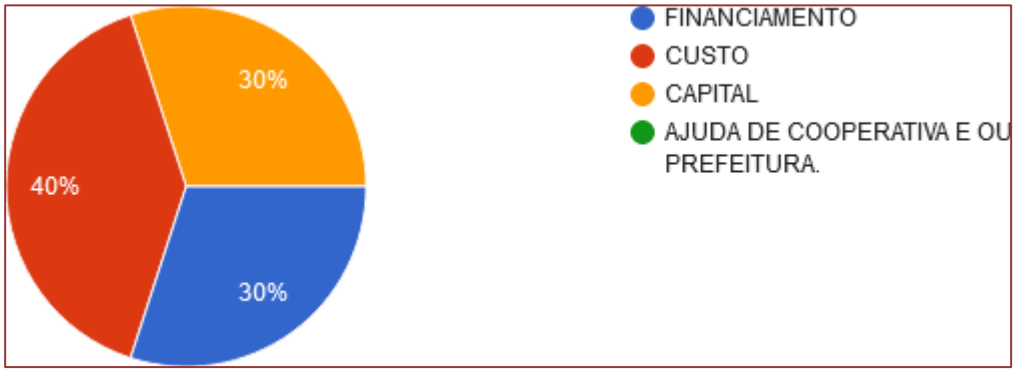
Figura 6 - Formação de custos de operação das batedeiras de açaí estudadas



Fonte: os autores.

A totalidade das batedeiras analisadas possuía como funcionários, parentes dos empreendedores, e as batedeiras se localizavam em terreiro adjacente à residência própria deles, o que resultou em dados inexistentes sobre custos com aluguel do imóvel, além de dados imprecisos sobre a remuneração, e a água utilizada na batedeira geralmente é a mesma ligação da residência, porém passando por tratamento em filtros antes de ser utilizada na batedeira. Devido a isso, esses fatores foram suprimidos dos resultados da pesquisa. Sendo os utilizados para a finalidade do estudo o preço médio de venda do açaí e o custo com consumo de energia elétrica, devido essas considerações a figura 6 apresenta um gráfico com somente duas variáveis.

Figura 7 – Dificuldades financeiras apontadas pelos empreendedores como barreiras para a incorporação de placas fotovoltaicas em suas batedeiras



Fonte: os autores.

Como esperado, na Figura 7 nota-se que a principal dificuldade para a incorporação de sistemas fotovoltaicos nas batedeiras é a financeira, onde as barreiras são múltiplas, como a dificuldade de conseguir um financiamento (30%), o alto custo inicial (30%), o capital financeiro do empreendimento não é alto o suficiente para absorver um investimento a longo prazo como o de investir em um sistema fotovoltaico. Isso se reforça com os dados apresentados na Figura 3, onde é mostrado que 80 por cento das batedeiras estudadas tem de 12 a 60 meses de atuação no mercado enquanto um financiamento médio sem entrada de um sistema fotovoltaico dura em média 60 meses.

Quadro 1 - Consumo de energia elétrico médio por batedeira no ano de 2023

Batedeira	Valor médio do consumo de energia elétrica Kwh (quilowatt hora) por mês (R$)
Batedeira A	680,00
Batedeira B	400,00
Batedeira C	900,00
Batedeira D	500,00
Batedeira E	300,00
Batedeira F	120,00
Batedeira G	500,00
Batedeira H	250,00
Batedeira I	700,00
Batedeira J	900,00

Como principal insumo depois do próprio açaí, o consumo de energia elétrica está intimamente ligado a viabilidade da instalação do sistema fotovoltaico, os valores contidos no Quadro 1 foram obtidos através do questionário presente no Apêndice A e são de suma importância para avaliar os custos de aquisição e/ou financiamento, ainda no Quadro 1 é possível avaliar que a média de consumo de energia elétrica entre as batedeiras pesquisadas é de 525 Kwh. Todavia, como a diferença entre os valores de consumo que vão de 120 Kwh a 900 kWh, a média encontrada é usada somente como o consumo médio sem aplicação no trabalho.

4.1. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

As batedeiras de açaí em sua maioria utilizavam padrões bifásicos que possui um consumo mínimo de 50 Kw, dessa forma utilizando os dados do Quadro 1, para a batedeira A, temos que em vez do sistema ser calculado para um consumo de 680 KW ele deve ser dimensionado para 630 Kw , para a Radiação solar local foi utilizado a média dos valores apresentados no anexo A, sendo definido o valor de 4,83 kWh/m^2/ano, substituindo os valores da Quadro 1 para batedeira A que será usada como exemplo, bem como os valores supracitados na equação (1), temos que a Potência Teórica do Sistema Fotovoltaico igual a 3,64 Kwp.

Para a quantidade de placas foi utilizada a equação (2), onde se obteve um valor de 11 placas para a batedeira A, A Potência do inversor foi definida para que o mesmo possua no máximo 75 porcento da capacidade das placas fotovoltaicas, no caso da Batedeira A com as placas teriam uma potência teórica de 3,64 Kwp então a potência do inversor deve ser igual a PI=2730 w.

4.2. CUSTOS MÉDIOS DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Utilizando os dados que constam no anexo B para a batedeira A, levando em conta os dados ja calculados como o Pfv, Qp e o PI temos:

Custo médio da aquisição das placas:

Custo médio de aquisição das placas (CMAP) é obtido através da multiplicação da Potência Teórica do Sistema Fotovoltaico pelo custo unitário por watt- pico (Wp), sendo montada a equação (4), tem-se:

$$CMAP: \ Pfv \times R\$ \ 2,2 \qquad (4)$$

Substituindo dados obtidos anteriormente na equação (4), para a batedeira A, temos:

$$CMAP = Pfv \times R\$ \ 2,2 \qquad (4)$$

$$CMAP = 3640 \times R\$ \ 2,2 \qquad (4)$$

$$CMAP = R\$ \ 8008$$

Custo do inversor:

O Custo do inversor é obtido através, da definição primeiro do valor da potência do inversor, e posteriormente a comparação desse valor com os dados do anexo B, onde inversores com potência:

2kW> custam R$ 2,5 reais por W;

5Kw> PI>2kW custam R$ 1,30 reais por W;

10 Kw> PI>5kW custam R$ 1 reais por W;

Substituindo dados obtidos anteriormente para a potência do inversor da batedeira A, temos.

PI=2730 w

5Kw>PI>2Kw

Logo:

CI= PI x 1,30

CI= 2730 x 1,30

CI= R$ 3549

Custo médio da instalação do sistema em uma cobertura de fibrocimento

Custo médio da instalação do sistema em uma cobertura de fibrocimento (CIS) = Qp x 120 de acordo com o anexo B.

Aplicando para o exemplo da batedeira A;

Custo da instalação do sistema em uma cobertura de fibrocimento = 11 x 120

Custo da instalação do sistema em uma cobertura de fibrocimento = R$1320

Custo médio total do sistema fotovoltaico:

CMAP+ + CI + CIS

Custo total do sistema fotovoltaico para a batedeira A: R$ 8008 + R$ 3549+ R$1320

Custo total do sistema: R$12.877

Aplicando o mesmo passo a passo mostrado acima para as outras batedeiras gerou-se os dados para as outras batedeiras gerando o Quadro 2.

Quadro 2 - Custos médios por batedeira

Batedeira	Custo médio de aquisição das placas	Custo médio do inversor	Custo médio da instalação do sistema em uma cobertura de fibrocimento	Custo médio Total
Batedeira A	R$ 8.008	R$3549	R$1.320	R$12.877
Batedeira B	R$ 4.461,6	R$ 3.802,5	R$ 720	R$8.984,1
Batedeira C	R$10.780	R$4.777	R$1.800	R$ 17.357
Batedeira D	R$5.720	R$4.875	R$960	R$ 11.555
Batedeira E	R$3.190	R$2.725	R$600	R$ 6. 515
Batedeira F	R$1,527	R$1.300	R$120	R$ 2.947
Batedeira G	R$5.720	R$4.875	R$960	R$ 11.555
Batedeira H	R$2,542	R$2,1675	R$120	R$3.186,5
Batedeira I	R$9,086	R$4,02675	R$1.560	R$14.67275
Batedeira J	R$10.780	R$4.777	R$1.800	R$ 17.357

4.3. PROJEÇÃO DE VALORES DE FINANCIAMENTO, ECONOMIA E TEMPO DE RETORNO.

Para calcular o financiamento para cada uma das batedeiras, considerando uma taxa de juros mensal de 1,5% e um prazo de financiamento de 60 meses, e os valores de Custo médio Total gerados no Quadro 2.

Batedeira A:

Valor a ser financiamento: R$12.877

Taxa de juros mensal: 1,5%

Prazo de financiamento: 60 meses

Utilizando o simulador online de financiamentos (IDinheiro, 2024) para a batedeira A obtivesse o seguinte resultado:

Pagamento mensal estimado: R$ 326,99

Total pago no financiamento: R$ 19.619,47

Juros devidos: R$ 6.742,47

Seguindo os passos executados para a obtenção de dados da projeção de financiamento da Batedeira A, o mesmo foi aplicado as outras batedeiras gerando o Quadro 3.

Quadro 3 - Valores referentes ao financiamento das batedeiras em um prazo de 60 meses

Batedeira	Valor a ser financiado	Valor da parcela mensal do financiamento	Valor total do financiamento	Valor dos juros
Batedeira A	R$12.877	R$ 326,99	R$ 19.619,47	R$ 6.742,47
Batedeira B	R$8.984,1	R$ 228,14	R$ 13.688,23	R$ 4.704,13
Batedeira C	R$ 17.357	R$ 440,75	R$ 26.445,22	R$ 9.088,22
Batedeira D	R$ 11.555	R$293,42	R$17.605,26	R$ 6.050,26
Batedeira E	R$ 6. 515	R$ 165,44	R$ 9.926,29	R$ 3.411,29
Batedeira F	R$ 2.947	R$74,83	R$ 4.490,07	R$ 1.543,07
Batedeira G	R$ 11.555	R$293,42	R$17.605,26	R$ 6.050,26
Batedeira H	R$3.186,5	R$80,92	R$ 4.854,97	R$ 1.668,47
Batedeira I	R$14.672,8	R$ 372,59	R$ 22.355,56	R$ 7.682,76
Batedeira J	R$ 17.357	R$ 440,75	R$ 26.445,22	R$ 9.088,22

4.3.1. ECONOMIA PROJETADA MENSAL E NO PERÍODO DO FINANCIAMENTO

Utilizando os dados obtidos no quadro 3 e aplicando os valores da batedeira A temos a equação (5).

$$E = Consumo - (Valor\ da\ parcela\ do\ financiamento + tarifa). \quad (5)$$

Onde:

E = Economia em reais

Consumo = Consumo da batedeira de acordo com o Quadro 1.

Tarifa= valor de 75 reais

Substituindo os valores para a batedeira A tem-se:

$$E = 680 - (326,99 + 75). \quad (5)$$

$$E = R\$278,01$$

Realizando os mesmos procedimentos para as demais batedeiras foi gerado o Quadro 4:

Quadro 4 – valores referentes economia projetada mensal e acumulada das batedeiras em um prazo de 60 meses

Batedeira	Valor aproximado de consumo de energia elétrica com impostos	Pagamento mínimo de tarifa de consumo de energia elétrica bifásico	Valor da parcela do financiamento	Economia mensal.
Batedeira A	R$ 680,00	R$75	R$ 326,99	R$278,01
Batedeira B	R$400,00	R$75	R$ 228,14	R$ 96,86
Batedeira C	R$900,00	R$75	R$ 440,75	R$ 384,25
Batedeira D	R$500,00	R$75	R$293,42	R$ 131,58
Batedeira E	R$300,00	R$75	R$ 165,44	R$ 59,56
Batedeira F	R$120,00	R$75	R$74,83	R$ –29,83
Batedeira G	R$500,00	R$75	R$293,42	R$ 131,58
Batedeira H	R$250,00	R$75	R$80,92	R$ 94,08
Batedeira I	R$700,00	R$75	R$ 372,59	R$ 252,41
Batedeira J	R$900,00	R$75	R$ 440,75	R$ 384,25

4.3.2. TEMPOS DE RETORNO DO INVESTIMENTO

Compilando todos os dados dos outros Quadros, foi então realizado o cálculo de tempo de retorno, onde primeiramente se realizou a subtração entre a economia projetada para o tempo de financiamento, 60 meses, e o valor total do financiamento, da diferença entre esses dois valores foi dividido pelo valor do consumo antes da instalação das placas solares menos a tarifa mínima, essa divisão é apresentada na equação (6)

Tempo de retorno parcial = Total do valor do financiamento – total projetado de economia (60*economia mensal) / (consumo antigo- tarifa de consumo mínimo).

Aplicando a batedeira A: R$ 19.619,47– (60 x 278,01) / (680 – 75). (6)

Tempo de retorno parcial para batedeira A

Tempo de retorno parcial:2938,87/ 605

Tempo de retorno parcial: 5 meses

Tempo de retorno total: 60 (tempo do financiamento) + (Tempo de retorno parcial)

Tempo de retorno total: 65 meses.

Aplicando o mesmo raciocínio a outra batedeira foi elaborada o Quadro 5.

Quadro 5 - Tempo de retorno em meses do investimento realizado

Batedeira	Economia mensal	Custo projetado total do financiamento	Tempo de retorno em meses
Batedeira A	R$278,01	R$ 19.619,47	65 meses
Batedeira B	R$ 96,86	R$ 13.688,23	78 meses
Batedeira C	R$ 384,25	R$ 26.445,22	64 meses
Batedeira D	R$ 131,58	17.605,26	82 meses
Batedeira E	R$ 59,56	R$ 9.926,29	87 meses
Batedeira F	R$ –29,83	R$ 4.490,07	206 meses
Batedeira G	R$ 131,58	17.605,26	82 meses
Batedeira H	R$ 94,08	R$ 4.854,97	52 meses
Batedeira I	R$ 252,41	22.355,56	71 meses
Batedeira J	R$ 384,25	R$ 26.445,22	64 meses

4.4. ANÁLISE DOS DADOS E DE VIABILIDADE

Batedeira A: Apresenta um tempo de retorno de 65 meses, com uma economia mensal de R$ 278,01 e um investimento inicial de R$ 19.619,47. O tempo de retorno é um pouco mais alto que o tempo de financiamento, mas o investimento inicial também é relativamente significativo.

Batedeira B: Possui um tempo de retorno de 78 meses, com uma economia mensal de R$ 96,86 e um investimento inicial de R$ 13.688,23. O tempo de retorno é um pouco mais longo em comparação com a Batedeira A, mas o investimento inicial é menor.

Batedeira C: Tem um tempo de retorno de 64 meses, com uma economia mensal de R$ 384.25. E um investimento inicial de R$ 26.445,22. Apresenta um tempo de retorno mais curto e uma economia mensal significativa.

Batedeira D: Apresenta um tempo de retorno de 82 meses, com uma economia mensal de R$ 131,58 e um investimento inicial de R$ 17.605,26. O tempo de retorno é razoável, com uma economia mensal decente.

Batedeira E: Possui um tempo de retorno de 87 meses, com uma economia mensal de R$ 59,56 e um investimento inicial de R$ R$ 9.926,29. O tempo de retorno é mais longo, e a economia mensal é relativamente baixa.

Batedeira F: Apresenta um tempo de retorno muito longo de 206 meses, o que indica que o investimento inicial pode não ser justificado pela economia mensal negativa.

Batedeira G: Tem um tempo de retorno de 82 meses, com uma economia mensal de R$ 131,58 e um investimento inicial de R$17.605,26. Similar à Batedeira D em termos de tempo de retorno e economia mensal.

Batedeira H: Possui um tempo de retorno de 52 meses, com uma economia mensal de R$ 94,08 e um investimento inicial de R$ R$ 4.854,97. Apresenta um tempo de retorno relativamente curto, abaixo do tempo total de financiamento e um investimento inicial baixo.

Batedeira I: Apresenta um tempo de retorno de 71 meses, com uma economia mensal de R$ 239,41 e um investimento inicial de R$ 23.135,4. A economia mensal é alta, mas o tempo de retorno é um pouco mais longo.

Batedeira J: Tem um tempo de retorno de 64 meses, com uma economia mensal de R$ 384.25 e um investimento inicial de R$ 27.358,2. Similar à Batedeira C em termos de tempo de retorno e economia mensal.

Em resumo, as batedeiras com tempos de retorno mais curtos e economias mensais mais altas tendem a ser mais viáveis do ponto de vista financeiro. No entanto, é importante considerar que diversas variáveis podem influenciar a eficácia dos painéis solares ao longo do tempo. Mudanças nos hábitos de consumo de energia pelo profissional batedor de açaí, possíveis aumentos no sistema de produção de açaí e variações nos preços da energia elétrica são apenas alguns exemplos. Portanto, uma análise contínua e adaptação do modelo são essenciais para garantir a máxima eficiência e rentabilidade do sistema de energia solar ao longo do tempo, tornando-se fundamental para o sucesso do empreendimento.

4.5. MODELO MATEMÁTICO

Através dos dados analisados neste trabalho é possível criar dois modelos matemáticos que podem nortear a decisão do responsável pela batedeira de açaí a adquirir ou não tais sistemas, o primeiro modelo é a relação entre o consumo médio mensal de energia e a economia mensal de energia projetada, onde através do resultado desta o responsável pode avaliar se aquele valor mensal de economia é viável para ele de um ponto de vista pessoal, onde levará em conta sazonalidades do consumo , como períodos de entre safra

$$\sum_{i=1}^{n}(Ci - Ei) \qquad (7)$$

C= Consumo médio mensal de energia.

E= economia mensal de energia projetada

$$\sum_{i=1}^{n} Ti < Tmax \qquad (8)$$

Ti = Tempo de retorno do investimento

T= Tempos máximo arbitrado pelo proprietário para um retorno satisfatório.

Em síntese mesmo um projeto de implantação de um sistema de energia fotovoltaica em uma batedeira de açaí seja tecnicamente e economicamente viável é necessário que o proprietário tenha interesse, no mesmo pois dele parte o poder de decisão, é como apresentado no Quadro 5 e equacionado na equação (8) o tempo de retorno do investimento pode ser uma barreira para a entrada desses empreendedores.

5. CONCLUSÃO

O estudo sobre a avaliação de potencialidade e viabilidade financeira da implementação de sistemas fotovoltaicos em estabelecimentos de venda de polpa de açaí revelou perspectivas promissoras para a adoção da energia solar na região de Macapá. Os resultados obtidos destacam os benefícios econômicos que podem ser alcançados por meio dessa transição energética, demonstrando o potencial de redução de custos operacionais e o retorno financeiro a longo prazo.

No entanto, é importante ressaltar também que esses benefícios, para serem completamente usufruídos, requerem uma análise individualizada do cenário financeiro e das condições específicas de cada empreendimento. Mesmo em cenários favoráveis, é fundamental avaliar as possibilidades financeiras disponíveis e a real necessidade, além de considerar fatores políticas de incentivo governamental e estratégias de financiamento, que podem mudar ao longo do tempo e podem afetar positivamente ou negativamente estudos de viabilidade.

Por fim avalia-se que os objetivos propostos neste estudo foram alcançados, e as informações sobre a viabilidade da implementação de sistemas fotovoltaicos em estabelecimentos de venda de polpa de açaí que se esperava identificar nas batedeiras pesquisadas, foram apontadas e analisadas. Com base nos resultados apresentados, este estudo tem o potencial de apresentar uma análise abrangente e concreta ao proprietário, auxiliando na tomada de decisão sobre a instalação ou não do sistema fotovoltaico em seu empreendimento, e pode instigar a sociedade acadêmica a fazer mais estudos correlatos que possam enriquecer o material de consulta sobre o tema.

REFERÊNCIAS

[1] ARAÚJO, J. P. M., ARAÚJO, R. S. Exploração do açaí de várzea em áreas nativas e manejadas na Comunidade Foz do Rio Mazagão Velho. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Licenciatura em Educação do Campo – Ciências Agrárias e Biologia, Universidade Federal do Amapá, Mazagão, 2020. 46p.

[2] ARMANDO, D. M. de S. Caracterização das batedeiras e portos de recebimento de açaí no estado do Amapá. Monografia. Curso de Especialização em Economia e Meio Ambiente. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Curitiba-PR, 2015.

[3] AAKER, D. A, KUMAR. V, DAY. Marketing Research, 7th edition. New York-NY: John Wiley and Sons, 2001.

[4] BEZERRA, V. S. Planejando batedeira de açaí. Folhetos. Embrapa Amapá. Macapá. AP. 2011. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/939272/planejando-batedeira-de-acai. Acesso em: 27 fev. 2024.

[5] BIMG METVISA. Downloads Batedores e Despolpadores. Disponível em: https://www.metvisa.com.br/downloads/. Acesso em: 27 fev. 2024.

[6] BRASIL. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2018. Rio de Janeiro – RJ, 2019. Disponível em:

https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/25437-pevs-2018-producao-da-silvicultura-e-da-extracao-vegetal-chega-a-r- 20-6-bilhoes-e-cresce-8-0-em-relacao-a-2017. Acesso em: 26 fev. 2024.

[7] BRASIL. INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS APLICADAS (IPEA). Cadeias de Comercialização de Produtos Florestais não Madeireiros na Região Sul do Amapá. Relatório de pesquisa. Rio de Janeiro – RJ, 2015. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7476. Acesso em: 26 fev. 2024.

[8] CARVALHO, A. C. A., COSTA, F. de A. SEGOVIA, J. F. O. Caracterização e análise econômica do Arranjo Produtivo Local do açaí nativo no Estado do Amapá. In: Arranjos Produtivos Locais e Desenvolvimento. Cap. 7, Embrapa Amapá, Macapá-AP, 2017. p. 109-128.

[9] COSTA, D. S. da, OLIVEIRA, L. B. de. Análise do agroextrativismo do açaí (Euterpe oleracea mart.) na região do rio Ariramba, Mazagão, Amapá. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Graduação em Educação do Campo. Universidade Federal do Amapá. Mazagão-AP, 2019.

[10] BRASIL. CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA. Potencial Energético. Potencial Solar Sundata 3.0 Disponível em: https://cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata. Acesso em: 07 mar. 2024.

[11] CREÃO, M. 500 mil batedeiras de açaí: placa solar ON ou OFF Grid. Jornal a Gazeta do Amapá, 07 mar. de 2024.

[12] EULER, A. M. C. Aspectos Socioeconômicos e Ambientais do Açaizeiro no Estado do Amapá. II Jornada de Botânica e Ecologia. Macapá-AP. 2020. Disponível em: https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1145547/1/CPAF-AP-2022-Aspectossocioeconomicos-e-ambientais.pdf. Acesso em: 06 mar. 2024.

[13] EQUATORIAL ENERGIA. Valor de tarifas e serviços – demais classes. Disponível em: https://ap.equatorialenergia.com.br/valor-de-tarifas-e-servicos/#demais-classes. Acesso em: 28 de fev. 2024.

[14] FOGLIATTO, F. Pesquisa Operacional Engenharia de Produção. DEPROT / UFRGS. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/382_po_apostila_completa_mais_livro.pdf. Aceso em: 29 fev. 2024.

[15] IDINHEIRO. Simulador de financiamento de veículos. Disponível em: https://www.idinheiro.com.br/calculadoras/simulador-de-financiamento-de-veiculos/. Acesso em: 03 mar. 2024.

[16] G1 AMAPÁ. Aneel adia decisão sobre revisão tarifária de energia elétrica do Amapá. Disponível em: https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2023/12/12/aneel-adia-decisao-sobre- revisao-tarifaria-de-energia-eletrica-do-amapa.ghtml. Acesso em: 01 mar. 2024

[17] GRIMONI, J. A. B. Energia Solar Fotovoltaica. PEA-EPUSP. 2019. Disponível em: https://paineira.usp.br/sisea/wp-content/uploads/2019/03/Energia-Solar- Fotovoltaica-pme3561.pdf. Acesso em: 29 fev. 2024.

[18] LOPES. A. L. M., GALVÃO, A. L. M. da V. Introdução à Pesquisa Operacional - Livro didático. 3ª edição revista e atualizada. Palhoça SC: Unisul Virtual, 2010.

[19] MARTINELLI, F. PEREIRA, A. DARLAN R. Abordagem aos pontos comerciais de açaí na cidade de Paragominas sob aspectos higiênico-sanitários. Trabalho de Conclusão de Curso. Curso de Graduação em Agronomia. Universidade Federal Rural da Amazônia. Paragominas-PA, 2015.

[20] MAUÉS, R. Sistemas de manejo em açaizais nativos praticados por comunidades ribeirinhas na ilha maracapucu palmar, Abaetetuba – Pará – Brasil. Disponível em: https://www.repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/12292/1/Dissertacao_SistemasManejoAcaizais.pdf. Acesso em: 02 mar. 2024

[21] NOGUEIRA. O. L., et al. A cultura do Açaí. Periódico Embrapa. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/115005/1/Aculturadoacai.pdf. Acesso em: 27 fev. 2024.

[22] PARASURAMAN, A. Marketing research. 2. ed. Addison Wesley Publishing Company, 1991.

[23] PORTAL SOLAR. Energia solar on-grid ou off-grid? Qual devo escolher? Disponível em: https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-on-grid-ou-off-grid-qual-devo-escolher. Acesso em: 28 fev.

2024.

[24] RAIMUNDO, T. A. H. Curso projetando e dimensionando Sistema Fotovoltaico. Disponível em: https://aett.com.br/wp-content/uploads/2020/07/curso-projetando-e-dimensionando-sistema-fotovoltaico-Oficial.pdf. Acesso em: 28 fev. 2024.

[25] SANTOS FILHO, J. S. Condições higiênico-sanitárias do processo de obtenção artesanal de açaí no município de Macapá-AP. Dissertação (Mestrado em Vigilância Sanitária). Instituto Nacional de Controle de Qualidade em Saúde da Fundação Oswaldo Cruz (INCQS). Macapá-AP. 2015.

Capítulo 3

Estudo de viabilidade técnica e econômica de mudança de matriz energética para a geração de vapor

Luis Guilherme Barbosa Custódio
Natália Souza de Jesus
Paulo de Souza Pacheco Junior
Thyago Carvalho Marques
Fernando Nunes Belchior

Resumo: Com o crescente interesse em soluções energéticas sustentáveis, este artigo visa explorar alternativas na geração de vapor industrial. O principal objetivo deste artigo é apresentar um estudo de viabilidade técnica e econômica de uma matriz energética para a geração de vapor. A proposta inclui a introdução de caldeiras elétricas e a análise do impacto financeiro ao utilizá-la na indústria. A ideia é explorar como essa mudança poderia influenciar os custos operacionais e a eficiência energética da empresa. Foram utilizados indicadores essenciais para a tomada de decisão, garantindo uma análise abrangente e precisa dos efeitos esperados pela implementação das caldeiras elétricas. Por fim, são apresentados os resultados obtidos a partir desses indicadores, com o intuito de demonstrar o impacto financeiro e operacional que a adoção desse tipo de caldeiras pode trazer.

Palavras-chave: Viabilidade econômica, Geração de vapor industrial, Matriz energética.

1. INTRODUÇÃO

As caldeiras são componentes cruciais no setor industrial que proporcionam uma fonte de vapor confiável e eficiente para uma ampla gama de aplicações. A Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13) que estabelece os "requisitos mínimos para gestão da integridade cultural de caldeiras, vasos de pressão, suas tubulações de interligação e tanques metálicos de armazenamento", define as caldeiras como “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, excetuando-se refervedores e similares”. Resumidamente, é um equipamento que ferve a água para gerar o vapor que é enviado por várias linhas através da tubulação.

Elas são classificadas em duas categorias A e B, que são diferenciadas pela pressão de operação, mas a maioria possui uma eficiência que gira em torno de 65% a 85% (CIBO, 1997). O escopo desse estudo são as caldeiras elétricas, em que o princípio básico envolve a conversão de energia elétrica em calor, utilizando resistências elétricas submersas em água. Assim, tudo começa a funcionar com a introdução de água no sistema, geralmente por meio de bombas que garantem um fluxo contínuo e a pressão adequada para que à medida que a água entra na caldeira, ela passa por uma série de resistências elétricas que estão estrategicamente posicionadas para maximizar a transferência de calor. Quando a corrente elétrica passa pelas resistências, o calor gerado é transferido para a água, o que aumenta sua temperatura até o ponto de ebulição, onde ocorre a vaporização.

O controle da temperatura é feito através de termostatos e controladores automáticos que ajustam a intensidade da corrente elétrica, o que garante que a água atinja a temperatura desejada de forma eficiente e segura. Este processo é altamente controlado e permite ajustes precisos na produção de vapor, o que é essencial para operações industriais que requerem condições específicas de temperatura e pressão. Isso garante a afirmação de Rocco (2011) "que caldeiras industriais queimam combustíveis e geram energia térmica, elevando a temperatura da água e transformando-a em vapor".

As aplicações do vapor gerado por caldeiras industriais elétricas são vastas. No setor de manufatura, o vapor é utilizado para aquecer matérias-primas, acelerar processos químicos e esterilizar equipamentos. Na indústria alimentícia, o vapor desempenha um papel crucial na pasteurização e limpeza de equipamentos, de maneira que os produtos atendam aos rigorosos padrões de higiene e segurança. Cruz Et Al. (2022) estudou a eficiência de caldeiras em uma indústria de laticínios em São Geraldo em Minas Gerais de maneira a ajudar essa empresa a melhorar o equipamento para que assim consigam reduzir a utilização de combustíveis de fonte de energia não renovável.

Além disso, o vapor é amplamente utilizado na geração de energia, onde é empregado para acionar turbinas que produzem eletricidade. Por fim, a indústria farmacêutica também se beneficia do uso do vapor, utilizando-o para a produção de medicamentos e na esterilização de ambientes controlados.

A versatilidade das caldeiras elétricas, aliada à sua capacidade de fornecer vapor de alta qualidade de forma consistente, as tornam indispensáveis em muitas operações industriais. Seu design compacto e operação limpa, sem a necessidade de combustíveis fósseis, fazem delas uma opção ambientalmente amigável e econômica para a produção de vapor.

No cenário industrial atual, a busca por eficiência energética não é mais uma opção, mas sim uma necessidade. A utilização de caldeiras elétricas, por exemplo, destaca-se como

uma alternativa promissora para reduzir o impacto ambiental e os custos operacionais, aliada à crescente preocupação com as mudanças climáticas e a escassez de recursos naturais, impulsiona a busca por soluções mais sustentáveis. Nesse contexto, a eficiência energética se torna um pilar fundamental para a indústria, onde permite não apenas a redução das emissões de gases de efeito estufa, mas também a otimização do consumo de energia e a diminuição dos custos de produção.

Além dos benefícios ambientais, a eficiência energética também se traduz em vantagens econômicas significativas para as indústrias. A redução do consumo de energia impacta diretamente os custos operacionais e isso torna as empresas mais competitivas e resilientes em um mercado cada vez mais exigente. Com isso a adoção de práticas de ESG (Enviromental, Social and Governance), como a utilização de caldeiras elétricas e a otimização de sistemas já existentes, como demonstrado por Cruz et al. (2022), fortalece a imagem da empresa para investidores e consumidores, que buscam cada vez mais por produtos e serviços de empresas comprometidas com o pilar de sustentabilidade. A longo prazo, a eficiência energética se mostra um investimento estratégico, capaz de gerar resultados positivos tanto para o meio ambiente quanto para os negócios.

2. MÉTODO, MODELAGEM E IMPLEMENTAÇÃO

Para o uso das caldeiras é preciso uma fonte de energia para aquecer a água, sendo essa fonte renovável ou não. Uma das formas de fazer isso, é utilizando o Gás Natural Liquefeito – GNL, uma das opções mais econômicas e que diminui também a emissão de gases de efeito estufa. Porém, para produzi-lo é necessária uma infraestrutura dispendiosa, o que resulta em um investimento elevado. Como reportado pela Época Negócios em 2022, o custo do GNL importado disparou devido à crise de produção na Europa, restando para o Brasil acelerar projetos de produção gás natural, o que evidencia a necessidade de buscar alternativas mais baratas e acessíveis.

Ainda segundo a reportagem, os analistas acreditam que esse aumento do preço do GNL deve se estender pelos próximos anos e como no Brasil a infraestrutura para a oferta desse tipo de energia não é tão expressiva, devido à redução de utilização das usinas termoelétricas, o país se torna dependente da importação, adquirindo o carburante por custos mais elevados. Caso a demanda de GNL diminua e seja necessário o uso da energia térmica, será necessário importar o carburante, o que não é tão viável, mesmo que o preço do GNL fique estável em 2024 e com previsão de estabilidade em 2025 e 2026. Essa dependência da importação e a volatilidade dos preços reforçam a importância de buscar soluções mais sustentáveis e economicamente viáveis para o aquecimento de caldeiras, como a utilização de caldeiras elétricas.

Além disso, houve a redução do preço do kWh de energia elétrica nos últimos anos, em função da criação do Mercado Livre de Energia (MLE), que oferece um ambiente de negociação livre, o que permite a grandes consumidores, como indústrias, negociem contratos de energia diretamente com geradoras e comercializadoras, diferente do modelo convencional fornecido aos consumidores que adquirem energia da distribuidora local a tarifas reguladas. Essa liberdade de escolha possibilita a busca por melhores preços e condições contratuais, muitas vezes resultando em economia significativa.

Outro motivo pelo qual a energia elétrica é mais atrativa, é que o MLE tem a crescente oferta de energia renovável, como solar e eólica, que frequentemente apresenta preços mais competitivos. Além disso, trabalhar com sistemas movidos a combustão envolve

sérios riscos associados ao potencial explosivo desses carburantes, exigindo certificações em NR-19 e influenciando no custo de seguros. Essa combinação de fatores torna as caldeiras elétricas uma opção cada vez mais viável e vantajosa para as indústrias que buscam reduzir custos, aumentar a eficiência energética e contribuir para um futuro mais sustentável.

Revisão Bibliográfica

A metodologia deste estudo inicia-se com uma revisão bibliográfica abrangente, cobrindo a literatura existente sobre geração de vapor e as diferentes matrizes energéticas aplicáveis. A pesquisa bibliográfica inclui:

- Artigos científicos publicados em revistas renomadas.
- Relatórios técnicos de instituições como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP).
- Normas técnicas brasileiras, como as da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Essas metodologias visam construir um alicerce teórico que guie a pesquisa e contribua para a obtenção de resultados precisos e significativos, fornecendo um embasamento teórico robusto que suporte as etapas subsequentes da análise.

Levantamento de Dados Primários

Para garantir a precisão e a relevância dos resultados, é fundamental a realização de um levantamento de dados primários. Este processo envolve a coleta direta de informações específicas sobre o consumo energético, a eficiência dos sistemas de geração de vapor e os impactos ambientais das matrizes energéticas, são eles:

- O consumo energético e custo operacional, possibilitando a identificação de áreas para otimização e redução de despesas.
- A eficiência dos sistemas de geração de vapor, permitindo ajustes e melhorias que podem aumentar a produtividade e reduzir desperdícios.
- Os impactos ambientais associados a cada matriz energética, auxiliando na escolha de alternativas mais sustentáveis.

Com esses dados, espera-se desenvolver modelos e métodos que possam ser implementados para alcançar uma operação mais eficiente e sustentável.

Análise Técnica

A análise técnica envolve a avaliação das opções de matrizes energéticas, especificamente a transição do Gás Natural Liquefeito (GNL) para a energia elétrica adquirida através do Mercado Livre de Energia. A avaliação é realizada em termos de:

- Eficiência energética.
- Confiabilidade e disponibilidade dos recursos.
- Complexidade de implementação e operação.

Neste estudo, serão utilizadas especificações técnicas para prever o desempenho econômico dos sistemas de geração de vapor com a nova matriz energética. A análise considerará a eficiência, a confiabilidade, a disponibilidade e a complexidade da

implementação e operação da energia elétrica em comparação com o Gás Natural Liquefeito (GNL).

Análise Econômica

A análise econômica será dividida em duas partes:

i. Custo de Investimento Inicial

Será avaliado o custo de implementação de cada matriz energética, incluindo:

- Aquisição ou modificação de equipamentos.
- Instalação e comissionamento.
- Adequações estruturais necessárias.

Assim, sendo possível avaliar os custos associados à aquisição ou modificação dos equipamentos essenciais para a nova matriz energética, com base em diferentes opções de investimento, para identificar a mais viável economicamente.

ii. Custo Operacional

Serão analisados os custos operacionais ao longo do ciclo de vida dos sistemas, considerando:

- Custos de combustível ou insumos energéticos.
- Manutenção e reparos.

Assegurando-se que a recomendação da transição para a nova matriz energética seja financeiramente sustentável e vantajosa para a indústria.

Estudo de Caso

Para validar a metodologia, será conduzido um estudo de caso em uma indústria brasileira que esteja considerando a mudança de sua matriz energética para a geração de vapor. O estudo de caso incluirá:

- Análise detalhada das condições atuais da planta para compreender o estado atual da infraestrutura e operação para estabelecer uma linha de base.
- Proposta de mudança para uma nova matriz energética.
- Estudo de viabilidade técnica e econômica.
- Avaliação dos impactos ambientais.

Com esse estudo, será obtida uma base sólida para a tomada de decisão e a implementação de melhorias na matriz energética da indústria atual.

Fórmulas Utilizadas

Para a conversão da queima do GNL em energia térmica, utilizou-se a seguinte equação.

$$E = V * PCI \quad \text{(Eq. 1)}$$

Onde:

E = Energia térmica liberada na queima do combustível

V = Volume de combustível a ser considerado

PCI (Poder Calorífico Inferior) = quantidade de energia liberada pela queima completa de uma unidade de massa (ou volume) do gás.

Para o cálculo dos indicadores, foram utilizadas as seguintes fórmulas:

$$VPL_j = \sum_0^n F_n(1+i)^{-n} \qquad \text{(Eq. 2)}$$

$$VPL_a = VPL \cdot \frac{i\cdot(1+i)^n}{(1+i)^n-1} \qquad \text{(Eq. 3)}$$

$$IBC = \frac{Valor\ presente\ do\ fluxo\ de\ benefícios}{Valor\ presente\ do\ fluxo\ de\ investimentos} \quad \text{(Eq 4.)}$$

$$ROIA = IBC^{\left(\frac{1}{n}\right)-1} \text{ (Eq. 5)}$$

$$ROI = (1+ROIA) * (1+TMA) - 1 \text{ (Eq. 6)}$$

Onde:

VPL_j = Valor presente líquido

n = cada um dos diversos valores envolvidos no fluxo de caixa

Fn = cada um dos diversos valores envolvidos no fluxo de caixa e que ocorrem em n.

i = taxa de juros comparativa ou taxa mínima de atratividade (TMA)

VPL_a = Valor presente líquido anualizado

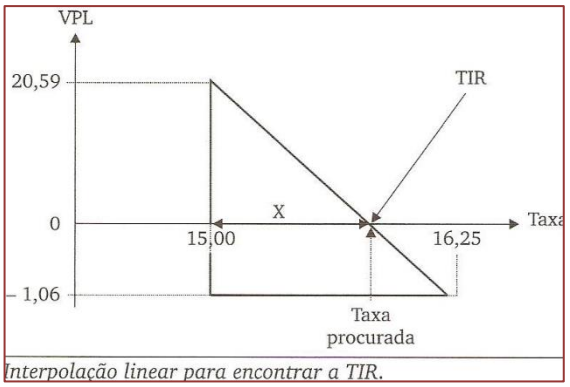
IBC = Índice Benefício/Custo

ROIA = Retorno Adicional sobre o Investimento

ROI = Retorno sobre o Investimento

Para o cálculo da TIR, foi considerada a semelhança de triângulos, como calculado para o seguinte exemplo:

Figura 1 – Modelo para o cálculo da TIR



Interpolação linear para encontrar a TIR.

Por meio da imagem, podemos calcular o valor da TIR como:

TIR = (Altura do triângulo menor * Base do triângulo maior)/Altura do triângulo maior.

Conclusão e Recomendações

A partir das análises técnicas, econômicas e ambientais, serão elaboradas conclusões e recomendações para a indústria brasileira sobre a viabilidade da mudança de matriz energética para a geração de vapor. As recomendações incluirão:

- Melhores práticas para a implementação de novas matrizes energéticas.
- Sugestões de políticas e incentivos governamentais para facilitar a transição.
- Recomendações para a implementação de práticas de ESG (Enviromental, Social and Governance) e fortalecimento da imagem da empresa junto a investidores e consumidores.

Essas diretrizes são fundamentais para orientar a indústria na adoção de medidas sustentáveis e economicamente viáveis, alinhadas com as exigências atuais de mercado e regulatórias.

3. COMPOSIÇÃO DO INVESTIMENTO INICIAL

Para a composição do investimento inicial, foram considerados os seguintes aspectos: aquisição do equipamento, logística, serviço de instalação e manutenção. Com relação à ampliação/construção da rede elétrica necessária para suprir o aumento de carga gerado pela caldeira elétrica, foram considerados todos os custos ligados à infraestrutura elétrica e mecânica, dentre eles a compra de equipamentos como transformadores, estruturas, disjuntores, painéis, cabos e retificadores. Os custos relacionados à caldeira elétrica foram obtidos juntamente à empresa Alfa Laval e os custos relativos à infraestrutura elétrica e mecânica foram obtidos com as empresas Volga, WEG e Schneider Electric.

Para a composição dos custos, foram consideradas duas situações; a implementação do sistema de vapor em conjunto com a construção de uma subestação de 138kV e de uma linha de transmissão para a alimentar a indústria e reduzir os níveis de oscilação na rede elétrica, e a implementação do mesmo sistema, considerando a expansão da rede elétrica, assumindo-se que a empresa já possui uma subestação interna.

Para as duas situações, foi considerada uma média de produção de vapor de 12 toneladas

por hora, baseado nos parâmetros de consumo da caldeira a gás de modelo AALBORG 3-PASS, da fabricante Alfa Laval.

Para eletrificar o processo de produção de vapor, foram necessárias 6 caldeiras do modelo Aalborg 2.000 EF que produzem cerca de duas toneladas de vapor por hora por unidade. Cada caldeira gera um acréscimo de 1.53 MW de carga, o que resulta em um acréscimo total de 9.18 MW. A partir desse acréscimo, foram levantados os custos da rede elétrica necessária para suprir essa demanda, dispostos na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 – Custos associados ao projeto

	Caso 1: Construção da Subestação	**Caso 2: Expansão da Subestação**
Equipamento/ Serviço	**Custo (R$)**	
Caldeira Elétrica	R$ 6.758.305,32	R$ 6.758.305,32
Rede de Média Tensão	R$ 4.473.661,04	R$ 3.648.076,28
Rede de Alta Tensão e Linha de Transmissão	R$ 29.479.353,31	R$ 0,00
Manutenção	R$ 130.000,00	R$ 130.000,00
Total	R$ 41.476.319,67	R$ 11.171.381,60

Com relação aos custos de aquisição do gerador de vapor elétrico, foram consideradas os itens listados na Tabela 2 apresentada abaixo:

Tabela 2 – Custos associados à caldeira elétrica

Equipamento/Serviço	**Custo (R$)**
Caldeira Aalborg 2.000 EF 10,3 barg	R$ 958.090,26
Válvula de descarga de fundo automática	R$ 9.029,90
Sistema de controle de nível contínuo com inversor de frequência	R$ 30.755,96
Bomba de alimentação de água reservada com acessórios	R$ 20.912,35
Resfriador de amostra	R$ 2.482,72
Medidor de vazão de água de make-up	R$ 24.241,81
Medidor de vazão de vapor	R$ 29.923,80
Termorresistência para água de alimentação	R$ 972,54
Jogo de peças sobressalentes para 2 anos	R$ 21.726,95
Inspeção inicial e abertura de livro	R$ 3.302,95
Despesas de viagem do técnico para start up	R$ 24.944,99
Total	R$ 1.126.384,23

Com relação aos custos de infraestrutura elétrica, foram considerados os valores listados na Tabela 3. É importante ressaltar que esses custos sofrerão variações, dependendo da opção de projeto a ser escolhida.

Tabela 3 – Custos associados à ampliação/construção da rede elétrica

Equipamento/Serviço	Custo (R$)
Transformador Abaixador com Dielétrico Líquido 12.500KVA 138KV	R$ 1.325.687,96
Conjunto de Média Tensão 13,8kV	R$ 505.004,00
Disjuntor 145 kV Tripolar 1250 A	R$ 112.179,40
Cabo de alumínio nu alma de aço	R$ 167.948,00
Painéis Elétricos	R$ 266.779,01
Conjunto de Elementos 21500-C	R$ 25.721,71
Retificador RMC	R$ 34.328,92
Circuitos Alimentadores	R$ 567.900,00
Transformadores Adicionais	R$ 765.000,00
3 Colunas SM6 MT	R$ 360.000,00
Painel de Força	R$ 250.000,00
Cabos de Alimentação das Caldeiras	R$ 660.000,00
Cabos de Média Tensão para Alimentação dos Transformadores	R$ 20.160,00
Cabos de Média Tensão entre Transformador e Cubículo de Alta Tensão	R$ 38.640,00
Estudo de Proteção e Seletividade	R$ 40.000,00
Estruturas Metálicas (Pórticos e Suportes)	R$ 660.000,00
Total	R$ 5.799.349,00

Conforme foi listado na Tabela 1, foram considerados como investimentos iniciais, os valores de R$ 41.476.319,67 para o projeto de implementação do sistema elétrico de geração de vapor e construção de uma subestação de alta tensão e R$ 11.171.381,60 para o projeto de implementação de um sistema elétrico de geração de vapor, considerando a ampliação de uma subestação já existente.

4. ANÁLISE DAS DESPESAS

Para realizar a análise das despesas do projeto, foram levantados os gastos com manutenção da rede elétrica e do gerador de vapor. Além disso, calculou-se o ganho que teremos com a alteração da matriz energética. Esses cálculos serão detalhados a seguir:

Custos com Manutenção

Para o levantamento dos custos de manutenção, foram considerados tanto o custo de manutenção da caldeira elétrica quanto da rede que recebe essa carga. Essas manutenções são realizadas anualmente e seus custos podem sofrer variações ao longo do tempo. Para a caldeira elétrica, foi verificada junto à fabricante um custo de manutenção anual de R$ 30.000,00 para todos os equipamentos utilizados. Em relação ao custo de manutenção da rede elétrica, foi considerado um valor de R$ 100.000,00 por ano, considerando todos os estudos e testes realizados nos dispositivos envolvidos (transformadores, disjuntores

etc.), gerando assim um custo anual total de R$ 130.000,00 por ano em manutenção.

Custos com Energia

Com relação aos custos energéticos, para a alteração da matriz de GNL (Gás Natural Liquefeito) para Energia Elétrica na geração de vapor, foi considerado um consumo de 12 toneladas de vapor por hora, o que resulta em um consumo mensal médio de 350 mil metros cúbicos de GNL. Ao considerar o custo atual do metro cúbico do GNL como R$ 4,98 (Sulgás), foi identificado o custo energético para a produção de vapor de R$ 1.743.000,00 por mês. Para obter a energia térmica liberada pela queima do GNL, foi utilizado o potencial calorífico do gás natural liquefeito (41.030,64 KJ/m^3 (Sulgás)).

Com isso, foi obtido o valor de 14.360.724.000 KJ por mês que ao ser convertido para kWh, foi obtido: 3.989.090 kWh. Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica o custo de energia elétrica para indústrias é: 0,29 R$/kWh. Dessa maneira, foi obtido um valor mensal em energia elétrica para geração de vapor de R$ 1.156.836,10. Esse custo gerou uma diferença de R$ 586.163,90 ao mês, em relação ao GNL. Portanto, foi identificado um ganho expressivo na geração de vapor por meio da energia elétrica.

Com os dados levantados, pode-se estabelecer o seguinte fluxo de caixa, valor presente e economia para o projeto de alteração de matriz energética para geração de vapor:

Tabela 4 – Fluxo de Caixa dos Projetos

PERÍODO	Fluxo de Caixa	
	Projeto A	Projeto B
0	-R$ 11.171.381,60	-R$ 41.476.319,67
1	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
2	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
3	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
4	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
5	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
6	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
7	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
8	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
9	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
10	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
11	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
12	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
13	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
14	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80
15	R$ 6.833.966,80	R$ 6.833.966,80

Tabela 5 – Valor presente dos projetos

PERÍODO	VP	
	Projeto A	Projeto B
0	-R$ 11.171.381,60	-R$ 41.476.319,67
1	R$ 6.176.201,36	R$ 6.176.201,36
2	R$ 5.581.745,46	R$ 5.581.745,46
3	R$ 5.044.505,62	R$ 5.044.505,62
4	R$ 4.558.974,80	R$ 4.558.974,80
5	R$ 4.120.176,05	R$ 4.120.176,05
6	R$ 3.723.611,43	R$ 3.723.611,43
7	R$ 3.365.215,94	R$ 3.365.215,94
8	R$ 3.041.315,80	R$ 3.041.315,80
9	R$ 2.748.590,87	R$ 2.748.590,87
10	R$ 2.484.040,56	R$ 2.484.040,56
11	R$ 2.244.953,05	R$ 2.244.953,05
12	R$ 2.028.877,59	R$ 2.028.877,59
13	R$ 1.833.599,27	R$ 1.833.599,27
14	R$ 1.657.116,38	R$ 1.657.116,38
15	R$ 1.497.619,86	R$ 1.497.619,86

Tabela 6 - Economia dos projetos

PERÍODO	Economia	
	Projeto A	Projeto B
0	-R$ 11.171.381,60	-R$ 41.476.319,67
1	-R$ 4.995.180,24	-R$ 35.300.118,31
2	R$ 586.565,22	-R$ 29.718.372,85
3	R$ 5.631.070,84	-R$ 24.673.867,23
4	R$ 10.190.045,64	-R$ 20.114.892,44
5	R$ 14.310.221,69	-R$ 15.994.716,39
6	R$ 18.033.833,12	-R$ 12.271.104,95
7	R$ 21.399.049,05	-R$ 8.905.889,02
8	R$ 24.440.364,86	-R$ 5.864.573,21
9	R$ 27.188.955,73	-R$ 3.115.982,34
10	R$ 29.672.996,29	-R$ 631.941,79
11	R$ 31.917.949,34	R$ 1.613.011,27
12	R$ 33.946.826,93	R$ 3.641.888,86
13	R$ 35.780.426,20	R$ 5.475.488,13
14	R$ 37.437.542,58	R$ 7.132.604,51
15	R$ 38.935.162,44	R$ 8.630.224,37

5. ANÁLISE DOS INDICADORES

Ao analisar os custos e ganhos envolvidos no projeto, foram calculados os indicadores de retorno e risco. Para esse cálculo, foi considerada uma TMA (Taxa Mínima de Atratividade) de 10,65% ao ano, que corresponde à taxa base de juros da economia brasileira. Além disso, foi pressuposto um horizonte de planejamento de projeto de 15 anos, conforme a vida útil do equipamento. Com os valores já estabelecidos, foram calculados os indicadores, listados na Tabela 4 a seguir. É importante ressaltar que o projeto A corresponde à expansão de uma subestação de alta tensão já existente e implementação do sistema elétrico para geração de vapor e o projeto B corresponde à implantação do mesmo sistema, considerando a construção de uma subestação de alta tensão.

Tabela 7 – Indicadores de Retorno e Risco

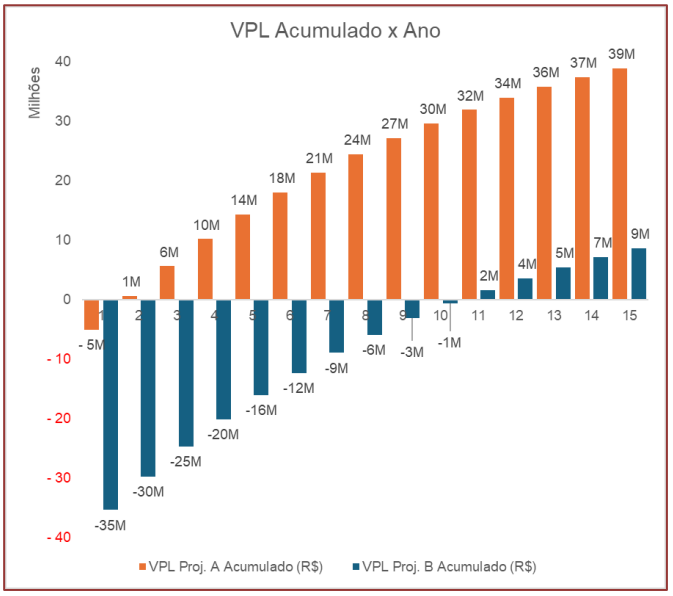
Método	Projeto A	Projeto B
Valor Presente Líquido (VPL)	R$ 38.935.162,44	R$ 8.630.224,37
Valor Presente Anualizado (VPLa)	R$ 5.310.316,50	R$ 1.177.065,15
Índice Benefício/Custo (IBC)	4,49	1,21
Retorno sobre Investimento (ROI)	22,29%	12,05%
Retorno sobre Investimento Adicionado (ROIA)	10,52%	1,27%
Taxa Interna de Retorno (TIR)	61,13%	14,24%
Payback (anos)	1,89	10,28

A análise detalhada dos indicadores de retorno e risco dos Projetos A e B revela que o Projeto A é significativamente mais vantajoso para investimento. A seguir, tem-se uma comparação detalhada entre os indicadores que justificam essa afirmação.

Valor Presente Líquido (VPL)

O VPL do Projeto A é de R$ 38.935.162,44, enquanto o do Projeto B é de R$ 8.630.224,37. Este indicador sugere que o Projeto A gera um valor presente significativamente maior, isso indica que os fluxos de caixa futuros descontados são substancialmente superiores ao investimento inicial. Um VPL mais alto é uma medida direta de maior lucratividade e viabilidade econômica do projeto. O Gráfico 1 apresenta o comportamento do VPL acumulado ao longo dos anos para os dois projetos. Através dele, pode-se identificar uma rapidez maior do projeto A em superar o valor investido.

Gráfico 1 – VPL acumulado ao longo dos anos



Valor Presente Anualizado (VPLa)

O VPLa do Projeto A é R$ 5.310.316,50, comparado a R$ 1.177.065,15 do Projeto B. Este indicador ajusta o VPL ao período do projeto, o que permite uma comparação direta da rentabilidade anual. O Projeto A demonstra um retorno anual mais robusto, tornando-o

uma opção mais atrativa em termos de geração de valor ao longo do tempo.

Índice Benefício/Custo (IBC)

O IBC do Projeto A é 4,49, enquanto o do Projeto B é 1,21. Este índice avalia a relação entre os benefícios gerados e os custos incorridos. Um IBC maior que 1 indica que os benefícios superam os custos, e o valor significativamente maior do Projeto A sugere que ele oferece um retorno quatro vezes superior ao custo, isso reforça sua superioridade econômica.

Retorno sobre Investimento (ROI)

O ROI do Projeto A é 22,29%, contra 12,05% do Projeto B. Este indicador mede a eficiência do investimento, reflete o lucro obtido em relação ao capital investido. O Projeto A apresenta um retorno percentual quase duas vezes maior, o que aponta uma melhor alocação de recursos e maior geração de lucro.

Retorno sobre Investimento Adicionado (ROIA)

O ROIA do Projeto A é 10,52%, enquanto o do Projeto B é apenas 1,27%. Este indicador avalia o retorno adicional obtido após cobrir todos os custos, reflete a capacidade do projeto de gerar lucros incrementais. A vantagem substancial do Projeto A neste aspecto reforça sua atratividade.

Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR do Projeto A é 61,13%, comparada a 14,24% do Projeto B. Ela representa a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa futuros ao investimento inicial. Se possui um valor mais alto indica um maior retorno percentual, como o indicador no projeto A é extremamente alta, sugere um investimento muito lucrativo.

Pay-back

O período de pay-back do Projeto A é de 1,89 anos, em contraste com 10,28 anos do Projeto B. Este indicador mede o tempo necessário para recuperar o investimento inicial. O Projeto A recupera o investimento em menos de dois anos, enquanto o Projeto B leva mais de uma década, isso demonstra uma vantagem clara em termos de liquidez e risco.

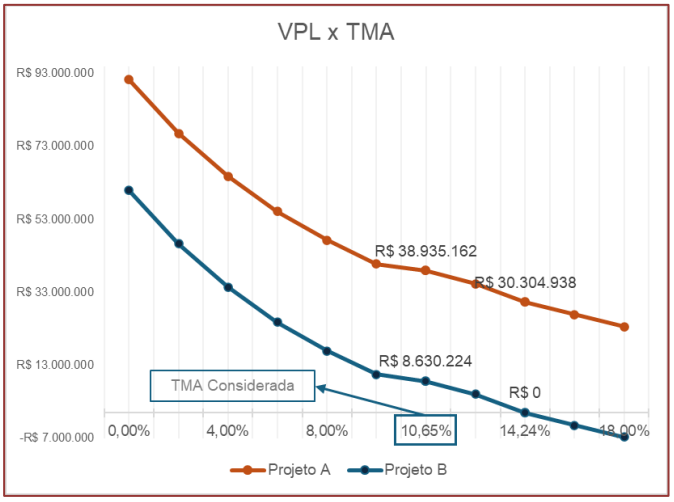
Através da análise comparativa dos indicadores econômicos e financeiros, é evidente que o Projeto A apresenta uma performance substancialmente superior ao Projeto B em todos os aspectos avaliados. O VPL e o VPLa mais altos indicam uma maior geração de valor presente e anual, enquanto o IBC, ROI, ROIA e TIR elevados confirmam a eficiência e lucratividade do projeto. Adicionalmente, o curto período de pay-back do Projeto A reduz os riscos associados ao investimento, tornando-o a opção mais segura e atraente.

Portanto, com base em uma análise abrangente e criteriosa dos indicadores apresentados, o Projeto A se mostrou como a melhor opção avaliada. Este projeto não só prevê um retorno financeiro superior, mas também oferece uma recuperação rápida do capital investido, o que maximiza os benefícios e minimiza os riscos para os investidores.

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

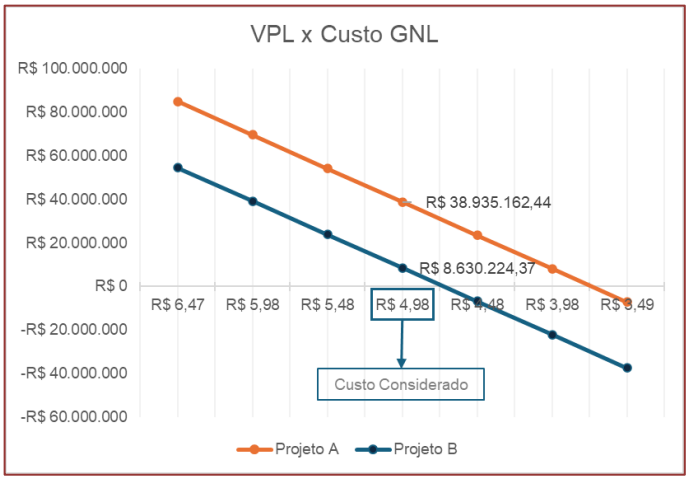
De acordo com a análise de indicadores, o projeto A possui uma atratividade substancialmente maior em relação ao projeto B. No entanto, o desempenho do projeto A é diretamente dependente de fatores externos, sendo esses a TMA considerada, taxa base de juros, o custo do GNL e da Energia Elétrica. Ao analisar a flutuação desses valores, é possível identificar até que ponto o investimento permanece atrativo. A seguir, tem-se a análise de sensibilidade sobre esses fatores.

Gráfico 2 – VPL x TMA



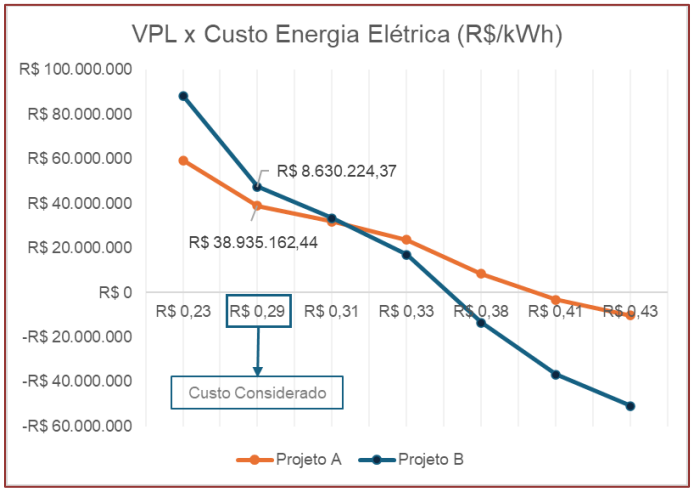
De acordo com o gráfico 2, considerando uma TMA igual a 14,24%, pode-se verificar que o projeto A assume um VPL igual a R$ 30.304.938,00 e o projeto B chega ao seu ponto de equilíbrio, com o VPL igual a zero. Caso isso ocorra, o investidor será desencorajado de investir no projeto B, visto que terá a mesma rentabilidade se investir na taxa base de juros e optará pelo projeto A, pois irá lhe garantir um retorno substancialmente mais expressivo sobre o investimento.

Gráfico 3 – VPL x Custo do GNL



Através do gráfico 3, é possível verificar que o VPL do projeto é dependente do preço do metro cúbico de GNL. Caso o valor o metro cúbico de GNL chegue a R$ 4,70, o projeto B assume um VPL igual a zero e torna-se uma opção inviável. Da mesma forma, caso o metro cúbico de GNL chegue ao valor de R$ 3,72, o projeto A acaba sendo inviabilizado, visto que seu VPL chega a zero. Através dessa análise, é possível concluir que o retorno do projeto depende diretamente da diferença entre os custos de energia elétrica e GNL.

Gráfico 4 – VPL x Custo de Energia Elétrica



De acordo com o gráfico 4, é possível notar que o aumento do custo de energia influencia diretamente na viabilidade econômica do projeto. Caso o valor do quilowatt-hora chegue a R$ 0,31, o VPL do projeto B se iguala a zero, o que torna a rentabilidade do projeto igual à da TMA. Caso o valor do quilowatt-hora chegue a R$ 0,40, o mesmo ocorre com o projeto A, que se torna uma opção inviável para os investidores, em termos de rentabilidade.

7. CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade técnica e econômica para a mudança de matriz energética na geração de vapor, evidencia de maneira clara e fundamentada, os benefícios significativos da transição para caldeiras elétricas em comparação com as opções tradicionais de Gás Natural Liquefeito (GNL). Ao longo da análise, diversos aspectos técnicos, econômicos e ambientais foram abordados e culminou em uma avaliação detalhada das vantagens e desvantagens das diferentes matrizes energéticas.

Com base nas análises técnicas, econômicas e ambientais, a mudança da matriz energética para a geração de vapor usando caldeiras elétricas, mostra-se altamente viável e vantajosa. O projeto que envolve a expansão de uma subestação de alta tensão (Projeto A) se destaca com melhores indicadores econômicos, como um Valor Presente Líquido (VPL) de R$ 38.935.162,44 e uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 61,13%, comparado ao projeto que envolve a construção de uma subestação para esse objetivo (Projeto B).

Recomenda-se a adoção de caldeiras elétricas devido aos seus benefícios ambientais e econômicos, incluem-se: a redução de custos operacionais e emissões de gases de efeito estufa. A implementação de práticas de ESG fortalecerá a imagem da empresa junto a investidores e consumidores. Políticas e incentivos governamentais são sugeridos para facilitar essa transição, juntamente com monitoramento contínuo de desempenho e eficiência energética.

A mudança para caldeiras elétricas representa um investimento estratégico, capaz de gerar resultados positivos para o meio ambiente e os negócios a longo prazo, o que contribui para o desenvolvimento sustentável e garante bons retornos.

REFERÊNCIAS

[1] BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. NR 13: Caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. 2022. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/conselhos-e-orgaos-colegiados/comissao-tripartite-partitaria-permanente/arquivos/normas-regulamentadoras/nr-13-atualizada-2022-retificada.pdf. Acesso em: 10 de julho de 2024.

[2] CIBO, Council of Industrial Boiler Owners. Energy efficiency handbook. Edited by Ronald A. Zeizt. Burke, 1997.

[3] Cruz, Marlons Lino. Estudo Da Eficiência Energética De Uma Caldeira Flamotubular Em Uma Indústria De Laticínios. 2022.

[4] EPBR. Wood Mackenzie vê preços do GNL em viés de baixa em 2024. Disponível em: https://epbr.com.br/wood-mackenzie-ve-precos-do-gnl-em-vies-de-baixa-em-2024/. Acesso em: 10 de julho de 2024.

[5] ÉPOCA NEGÓCIOS. Custo de GNL importado dispara e pressiona Brasil a acelerar projetos de gás. 2022. Disponível em: https://epocanegocios.globo.com/Economia/noticia/2022/09/epoca-negocios-custo-de-gnl-importado-dispara-e-pressiona-brasil-a-acelerar-projetos-de-gas.html. Acesso em: 10 de julho de 2024.

[6] GNPW. O que é o gás natural liquefeito? Disponível em: https://www.gnpw.com.br/energia-limpa/o-que-e-o-gas-natural-liquefeito/. Acesso em: 10 de julho de 2024.

[7] Marques, R. J. S., Campos, J. C. C., Tibiriçá, Álvaro M. B., Rezende, V. da S., & Siqueira, A. M. de O. (2023). Feasibility of Boiler Implementation in the Production Process of a Cosmetic Industry. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 9(2), 15138–01e.

[8] ROCCO, C. D. Um modelo de otimização para as operações de produção de vapor em caldeiras industriais: um estudo de caso na indústria de alimentos. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, 2011.

Capítulo 4

Acesso à energia, gênero e pobreza energética

Thamyrys Marques Azevedo
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

Resumo. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o acesso à energia no Brasil, abordando as questões de gênero, pobreza energética e a situação na Amazônia brasileira. A análise se baseia em artigos científicos e relatórios governamentais. Os resultados destacam desafios significativos no acesso à energia na região amazônica, especialmente em áreas remotas, e as desigualdades enfrentadas pelas mulheres devido à carga desproporcional de tarefas domésticas. Diante disso, são feitas recomendações para enfrentar essas disparidades, incluindo a implementação de políticas e medidas específicas que atendam às necessidades energéticas das mulheres. Embora o governo brasileiro tenha adotado iniciativas promissoras para a universalização do acesso à energia, a pobreza energética ainda persiste na região amazônica. Portanto, são recomendados o desenvolvimento de políticas públicas mais efetivas e investimentos em tecnologias de energia renovável para abordar essa questão. Essas recomendações visam melhorar substancialmente a qualidade de vida das comunidades locais e promover o desenvolvimento sustentável na região amazônica.

Palavras-chave: Acesso à energia, Gênero e energia, Amazônia Brasileira.

1. INTRODUÇÃO

Como as desigualdades de gênero, a pobreza energética e a falta de acesso à energia se entrelaçam na Amazônia Legal, impactando a qualidade de vida das comunidades e perpetuando o ciclo de exclusão elétrica na região? Esse é o questionamento central que norteia este trabalho.

O Brasil, como membro das Nações Unidas, tem se empenhado em cumprir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU como uma prioridade para combater a pobreza e promover a implementação da Agenda 2030. Para auxiliar nesse processo, a Secretaria de Governo criou a Comissão Nacional para os ODS, através do Decreto nº 8.892/2016 (2016).

Dentre os 17 ODS, um dos principais é o ODS 7, que visa garantir o acesso universal, seguro, sustentável e moderno à energia. No entanto, de acordo com o relatório anual do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) de 2022 (IEMA, 2022), a região da Amazônia Brasileira é uma das áreas com menor acesso à energia elétrica no país, afetando aproximadamente um milhão de pessoas. Essa realidade não apenas representa um obstáculo para o desenvolvimento econômico e social da região, mas também contribui para agravar as desigualdades e a pobreza energética na Amazônia.

Nesse sentido, Gomes, Varella e Vilela (2022) enfatizam a importância de se compreender que o acesso à energia vai além da disponibilidade física de eletricidade ou combustíveis, englobando também os serviços que essas fontes energéticas podem fornecer, como iluminação, refrigeração, comunicação e transporte. O acesso aos serviços energéticos é fundamental para melhorar a qualidade de vida das pessoas e da sociedade como um todo, especialmente para aqueles que ainda vivem em situações de pobreza energética no Brasil.

Diante desse cenário, o governo brasileiro lançou iniciativas como o Programa Luz para Todos (LPT) do Ministério de Minas e Energia (MME) e o Programa Mais Luz para a Amazônia (MLA), voltados para levar energia elétrica às áreas rurais da Amazônia que ainda não foram alcançadas pela rede elétrica. No entanto, a pobreza energética ainda afeta milhões de pessoas na região, principalmente as populações rurais e indígenas, além de haver desigualdades de gênero que devem ser consideradas. As mulheres, por exemplo, enfrentam desafios adicionais no acesso à energia, o que resulta em lacunas na educação, saúde e outros aspectos da vida.

Nesse contexto, é fundamental que as iniciativas de energia renovável na Amazônia levem em consideração a igualdade de gênero e o empoderamento feminino, contribuindo para alcançar o ODS 5, que visa a igualdade de gênero e o empoderamento das mulheres e meninas. Além disso, é crucial abordar os desafios relacionados ao acesso à energia, gênero e pobreza energética na Amazônia.

Portanto, o presente artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica dos estudos já realizados sobre as interconexões entre as desigualdades de gênero, a pobreza energética e a falta de acesso à energia na Amazônia Legal. Por meio dessa análise, busca-se identificar os principais aspectos relacionados a cada tema abordado, a fim de compreender como se entrelaçam e impactam a qualidade de vida das comunidades, perpetuando o ciclo de exclusão elétrica na região. Além disso, pretende-se ir além da identificação dos principais aspectos, apresentando recomendações para enfrentar essas problemáticas. Com base nos resultados da revisão bibliográfica, serão propostas medidas que visam contribuir para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)

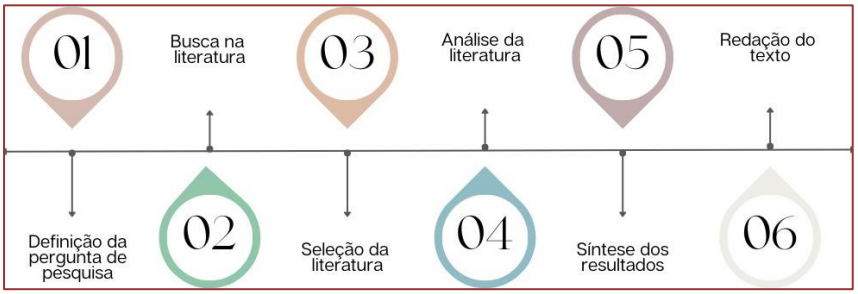
estabelecidos pela ONU, em especial os ODS 1, 5 e 7. Dessa forma, busca-se promover a erradicação da pobreza, a igualdade de gênero e o acesso a uma energia limpa e acessível na Amazônia Legal.

Este artigo está baseado em Azevedo (2023), que fez a pesquisa original no âmbito de um Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado em 2023 no curso bacharelado em ciência e tecnologia da Universidade Federal Rural do Semi-Árido.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos deste estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica da literatura sobre acesso à energia, gênero, pobreza energética e a situação energética da Amazônia Legal. A metodologia utilizada neste trabalho seguiu as seis etapas mostradas na Figura 1.

Figura 1 - Etapas da pesquisa realizada



Fonte: Azevedo (2023).

Tais etapas desenvolvidas no trabalho, conforme mostrado na Figura 1, são detalhadas:

1) Definição da pergunta de pesquisa: A primeira etapa foi a definição da pergunta de pesquisa que norteou toda a revisão bibliográfica. A pergunta foi formulada com base nos objetivos do estudo e na literatura existente sobre o tema.
2) Busca na literatura: A segunda etapa foi a busca por artigos, relatórios e outros documentos relevantes para a pesquisa. As fontes de pesquisa foram bases de dados científicas como SciELO, Web of Science, Google Scholar e outros repositórios de dados.
3) Seleção da literatura: Na terceira etapa, os artigos encontrados foram selecionados com base em critérios de inclusão e exclusão, tais como relevância para a pergunta de pesquisa, data de publicação e qualidade metodológica.
4) Análise da literatura: A quarta etapa envolveu a leitura e a análise crítica dos artigos selecionados. Foram identificados os principais conceitos e argumentos apresentados em cada artigo e como eles se relacionavam com a pergunta de pesquisa.
5) Síntese dos resultados: Na quinta etapa, os resultados da análise dos artigos foram sintetizados para responder à pergunta de pesquisa e alcançar os objetivos do estudo.

6) Redação do texto: Por fim, a sexta e última etapa foi a redação do texto final, que incluiu a introdução, a revisão bibliográfica, a discussão dos resultados e a conclusão.

A escolha do método se deve à sua objetividade e eficácia na identificação de estudos relevantes para a pesquisa. É importante ressaltar que, durante a busca, foram encontradas algumas limitações em relação à disponibilidade de estudos que relacionassem os temas propostos, especialmente em relação à importância do papel da mulher na questão energética e na região da Amazônia Legal.

3. ACESSO À ENERGIA, GÊNERO E POBREZA ENERGÉTICA

Nesta seção, são apresentadas as bases teóricas relacionadas ao acesso à energia no Brasil, gênero, pobreza energética e a situação energética na região da Amazônia brasileira. Abordam-se conceitos fundamentais sobre acesso à energia, destacando desigualdades existentes. Explora-se a relação entre energia e gênero, ressaltando como as mulheres são afetadas devido a fatores sociais, culturais e econômicos. Também é discutido o conceito de pobreza energética, suas causas e consequências. Por fim, aborda-se a situação energética na Amazônia, considerando desafios e oportunidades, dada a sua extensão territorial, presença de comunidades isoladas e a necessidade de soluções energéticas sustentáveis. Essas bases teóricas são essenciais para compreender a relação entre acesso à energia, gênero, pobreza energética e a situação energética na região da Amazônia brasileira.

3.1. ACESSO À ENERGIA NO BRASIL

A ampliação do acesso à energia elétrica é crucial para garantir uma vida digna às pessoas, permitindo o uso de serviços básicos, como iluminação e refrigeração, além de fomentar o desenvolvimento socioeconômico. Levando-se em consideração a Constituição Federal de 1988, o acesso à energia elétrica é direito de qualquer pessoa no Brasil. Além disso, garantir o acesso à energia barata, confiável, sustentável e renovável para todos faz parte dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS - 7) estabelecidos pelas Nações Unidas com meta de ser alcançada até 2030, incluindo a promoção do aumento da participação de energias renováveis na matriz energética global.

No entanto, mesmo com o compromisso dos ODS e os direitos constitucionais, o Brasil ainda enfrenta o desafio da exclusão elétrica. Embora o país conte com mais de 215 milhões de habitantes, conforme dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística no ano de 2022, cerca de um milhão de pessoas na região amazônica vivem em situação de exclusão elétrica, de acordo com o Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2022). Os programas governamentais de universalização da energia elétrica têm priorizado o atendimento do consumo residencial em detrimento das necessidades para atividades produtivas locais, apesar dos recursos limitados disponibilizados.

Diante desse cenário, é fundamental que o acesso à energia elétrica seja ampliado de forma sustentável, buscando minimizar os impactos negativos no meio ambiente e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Além de beneficiar as pessoas em sua vida cotidiana, a energia elétrica é essencial para impulsionar o desenvolvimento socioeconômico do país como um todo.

Segundo Gomes, Varella e Vilela (2022), o conceito de acesso universal à energia tem sido

mal compreendido ou mal implementado, o que afeta o desenho das ações necessárias para garantir esse acesso. Os autores destacam que o acesso à energia deve ser entendido como o acesso a serviços energéticos adequados, confiáveis, de qualidade, seguros, ambientalmente benignos e economicamente acessíveis para auxiliar o desenvolvimento humano e econômico. É importante compreender esse conceito de forma ampla para garantir o sucesso das ações de universalização da energia.

De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME), no Brasil, o processo de universalização da energia elétrica teve início em 2003, com a criação do Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica - Luz para Todos (LPT), com o objetivo de levar energia elétrica a domicílios rurais. A meta inicial era de 2 milhões de ligações até 2008, porém, a demanda foi maior do que o previsto, principalmente nas regiões Norte e Nordeste, resultando na prorrogação do programa até 2010. O programa já beneficiou mais de 16 milhões de pessoas na área rural até abril de 2017 e foi prorrogado novamente até 2022 para atender à parcela da população do meio rural que ainda não possuía acesso à energia elétrica. Mesmo após mais de 20 anos desde sua criação, o programa foi novamente prorrogado até 31 de dezembro de 2026, pelo Decreto 11.111 de 29 de junho de 2022, a fim de suprir as necessidades energéticas da população.

Outro projeto instituído pelo governo federal, de forma complementar ao Programa LPT, é o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica na Amazônia Legal - Mais Luz para a Amazônia (MLA). Tal programa foi criado em 2020 e tem como objetivo promover o acesso à energia elétrica para a população localizada nas regiões remotas da Amazônia Legal, visando o desenvolvimento social e econômico dessas comunidades, fomentando atividades voltadas para o aumento da renda familiar e pelo uso sustentável dos recursos naturais da região, integrando ações das várias esferas de Governo e promovendo a cidadania e a dignidade daquela população. O mesmo tinha o prazo para conclusão até 2022 e foi recentemente prorrogado para dezembro de 2030, conforme o Ministério de Minas e Energia (MME). A Tabela 1 mostra informações resumidas dos programas LPT e MLA.

Tabela 1 - Informações dos Programas Luz para Todos e Mais Luz para a Amazônia

LPT	MLA
Início em 2003	Início em 2020
Instituído pelo Decreto nº 4.873 (11 novembro 2003)	Instituído pelo Decreto nº 10.221 (05 fevereiro 2020)
Atendimento das áreas rurais em todo o território nacional	Atendimento somente na região da Amazônia Legal
Novos consumidores	Novos consumidores e consumidores existentes com uso de energia não renovável (substituição de geradores elétricos à diesel e gasolina)
Atendimento UC uso individual ou coletivo: SIGFI e MIGDI	Atendimento UC uso individual ou coletivo: SIGFI e MIGDI
Fontes renováveis e não-renováveis	Somente fontes renováveis
Vigência: até final de 2026	Vigência: até final de 2030

Fonte: Gomes, Varella e Vilela (2022).

3.2. ENERGIA E GÊNERO

Embora haja uma escassez de dados relacionando os termos "energia e gênero" no Brasil, é fundamental ressaltar que um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, o ODS-5, busca alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as meninas e mulheres. O Brasil já implementou um objetivo importante nesse sentido, que é reconhecer e valorizar o trabalho de assistência e doméstico não remunerado. Para isso, são coletados dados sobre a proporção de tempo dedicado a trabalho doméstico não remunerado e cuidados, levando em consideração sexo, idade e localização.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), com base nos dados disponíveis entre os anos de 2016 e 2019, as mulheres no Brasil dedicaram uma proporção maior de horas diárias aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos em comparação com os homens, dados do Objetivo 5 do ODS Brasil (2022). Essa disparidade é evidenciada na Tabela 2.

Tabela 2 - Proporção de horas diárias dedicadas aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos por sexo e idade no Brasil

Sexo/Grupo de Idade	Proporção (%)
Homens (14 a 29 anos)	4,0
Homens (30 a 49 anos)	5,8
Homens (50 a 59 anos)	5,7
Homens (60 anos ou mais)	5,8
Mulheres (14 a 29 anos)	9,3
Mulheres (30 a 49 anos)	13,1
Mulheres (50 a 59 anos)	13,5
Mulheres (60 anos ou mais)	11,7
Homens (Total)	**5,3**
Mulheres (Total)	**11,8**

Fonte: Elaboração própria a partir do indicador 5.4.1 (ODS Brasil, 2022).

De acordo com Danielsen (2012), mulheres e meninas passam a maior parte do dia realizando tarefas domésticas, desde as mais básicas até tarefas que exigem maior força física. Além disso, menciona em seu trabalho que as barreiras quanto ao direito das mulheres de acessar os serviços de energia ocorrem devido à falta de reconhecimento tanto do valor do trabalho das mulheres, onde elas não são remuneradas por realizar as tarefas domésticas, quanto do valor de seus papéis, quanto ao investimento até mesmo em tecnologias para a melhora no ambiente doméstico, além da internalização das normas sociais que consideram pouco o seu valor e contribuição, afetando seu acesso a serviços modernos de energia.

Em Reddy et al. (2000), é abordada a existência de quatro fatores que relacionam a energia e a mulher, a saber: a natureza dos recursos, as características da economia doméstica e comunitária, as políticas energéticas e a posição das mulheres nas famílias e comunidades. Ainda em Danielsen (2012), destaca-se que há diversas questões de gênero a serem consideradas no sistema energético, como a falta de reconhecimento das desigualdades de gênero, acesso e controle desigual de recursos e benefícios, falta de reconhecimento e contribuição das mulheres, tomada de decisão desigual de gênero, falta

de atendimento às necessidades energéticas das mulheres, disparidade de gênero na propriedade de recursos produtivos, deslocamento dos direitos das mulheres aos recursos naturais, falta de estruturas legais e regulatórias para promover o acesso equitativo de gênero à energia, acesso desigual de gênero a serviços financeiros e energia renovável e acesso desigual de gênero à energia moderna em áreas urbanas pobres.

De acordo com Rachtner e Rocha (2022), embora o acesso à energia elétrica em domicílios possa simplificar as atividades domésticas para as mulheres, ainda há uma desigualdade no acesso e uso de energia em comparação com os homens. No entanto, Ribeiro et al. (2021) complementa essa ideia, destacando que é fundamental que a igualdade de gênero seja uma prioridade nas políticas públicas de energia, para que haja uma inclusão efetiva das mulheres e para que as decisões sobre o uso e gestão da energia sejam tomadas de forma mais equitativa. Portanto, as mulheres têm um papel importante na gestão, produção, tomada de decisões e uso da energia em suas comunidades.

Além disso, Danielsen (2012) destaca que os serviços modernos de energia podem ter impactos positivos na saúde da mulher, melhorando a qualidade de vida em áreas rurais e apoiando o funcionamento de clínicas de saúde. A iluminação elétrica pode aumentar a escolaridade das meninas e aumentar a sensação de segurança pessoal e comunitária. As mulheres e meninas também podem economizar tempo e esforço com a tecnologia de cozimento aprimorada e o fornecimento de energia mecânica para atividades como coleta de água e agricultura.

Diante disso, é essencial que as políticas públicas de energia contemplem a perspectiva de gênero em sua elaboração, considerando as desigualdades e barreiras que as mulheres enfrentam no acesso e uso da energia. É importante reconhecer e valorizar o trabalho doméstico não remunerado realizado pelas mulheres e incluir as comunidades nas decisões sobre o uso da energia em suas regiões. A promoção da igualdade de gênero na área de energia é fundamental para a construção de uma sociedade mais justa e sustentável, como afirmam Danielsen (2012), Rachtner e Rocha (2022) e Ribeiro et al. (2021).

3.3. POBREZA ENERGÉTICA

De acordo com Healy et al. (2003), não existe uma definição padrão para o termo pobreza energética, visto que esse campo varia de acordo com as características socioeconômicas, demográficas e da habitação. Para Reddy et al. (2000) a pobreza refere-se à falta de acesso de uma família ou indivíduo, principalmente em questão a renda desproporcional quanto às necessidades básicas, assim, a pobreza seria “a incapacidade de alcançar um padrão mínimo do que é necessário para o bem-estar material”, quanto à dimensão pobreza energética os autores definem como a falta de escolha suficiente do indivíduo para acessar serviços energéticos adequados, confiáveis, de alta qualidade, seguros e ambientalmente benignos que corroborem para o desenvolvimento humano e econômico.

Na seção 3.1 deste trabalho, tratou-se sobre o acesso à energia e é importante ressaltar que apesar da energia ser uma condição necessária para o desenvolvimento social e econômico, a energia por si só não é suficiente. Em Winkler et al. (2011), é afirmado que apenas a conexão à rede elétrica não garante o uso da eletricidade para todos os fins, principalmente em famílias pobres, e afirmam também que domicílios recém conectados à rede elétrica permanecem com os níveis de consumo abaixo do esperado por um bom tempo, sendo um dos motivadores a falta de capacidade de realizar o pagamento.

Em Bouzarovski e Petrova (2015) os autores defendem que a pobreza energética deve ser considerada como um problema global, que afeta em sua maior parte famílias em vulnerabilidade, onde os indivíduos são incapazes de atingir os níveis social e materialmente suficientes dos serviços energéticos domésticos. González-Eguino (2015) declara que a pobreza energética pode ser medida em três abordagens alternativas, porém complementares, essas abordagens se concentram quanto ao acesso à energia de acordo com um limite físico, tecnológico ou econômico, que são, respectivamente:

Físico: a capacidade de atingir um consumo mínimo de energia associado às necessidades essenciais;

Tecnológico: problema de acesso a serviços energéticos modernos que atendam as demandas da família;

Econômico: a razão percentual de renda destinada aos gastos de energia, como o poder de compra e o preço da energia.

No Brasil o nível de pobreza é medido através do IDH (índice de desenvolvimento humano), responsável por classificar o grau de qualidade de vida dos países e o de desenvolvimento econômico, e suas dimensões são constituídas por: renda per capita, saúde e educação. É perceptível que a pobreza energética está intrinsicamente relacionada à própria definição de pobreza. Além disso, Nussbaumer et al. (2012) define a pobreza energética relacionada às necessidades domésticas em cinco dimensões: lazer e educação, iluminação, cocção, serviços ligados ao gozo de eletrodomésticos e comunicação. Logo, para compreender a esfera "pobreza energética" cabe não somente avaliar a vulnerabilidade econômica familiar, mas também relacionar esta situação ao acesso a diferentes serviços energéticos de qualidade associados ao desenvolvimento do ser humano.

Pobreza ou subdesenvolvimento podem ser conceitualizados como a ausência de capacidades para alcançar um trabalho bem remunerado, ter acesso a uma educação de qualidade e estar em um bom estado de saúde com base no artigo de Day, Walker e Simcock (2016). Segundo Clancy, Skutsch e Batchelor (2003), é importante enfatizar também que a energia é crucial para atender tanto às necessidades práticas e reprodutivas das mulheres, como também suas necessidades produtivas e estratégicas, incluindo o acesso à iluminação para estudo noturno, segurança em reuniões comunitárias e poder para o desenvolvimento de empreendimentos femininos.

Segundo o Objetivo 1 do ODS Brasil (2023), no ano de 2019, a proporção da população vivendo abaixo da linha de pobreza internacional no Brasil, era de algo em torno de 7% da população, mas em 2020 esse número diminuiu para aproximadamente 6%. Um fator importante que contribuiu para essa redução foi o avanço significativo do acesso à eletricidade em todo o país, alcançando uma taxa de 99,8% em 2019. De acordo com o estudo de Oliveira Gomes, Saath e Piai (2020), com a ampliação do acesso à energia elétrica no Brasil, novos desafios surgem, com a pobreza energética, que está relacionada à falta de acesso a serviços de energia de qualidade e acessíveis. No entanto, outros fatores também afetam o setor de distribuição, como as desigualdades sociais, a localização geográfica e questões culturais. Além disso, a exclusão social ainda é um grande problema no país, que contribui para a inadimplência e o furto de energia elétrica em algumas áreas.

De acordo com Paiva et al. (2019), o governo brasileiro concede subsídios e incentivos para reduzir as despesas com energia elétrica, sendo a principal medida a implantação da Tarifa Social no ano de 2011. Essa tarifa oferece descontos para a população de baixa

renda, financiados pelos pagamentos da tarifa convencional. Para usufruir da Tarifa Social, é preciso atender a critérios como estar inscrito no Cadastro Único para Programas Sociais do Governo Federal com renda familiar mensal per capita menor ou igual a meio salário mínimo, ou ter portador de doença ou deficiência cujo tratamento demande consumo de energia elétrica, ou receber o Benefício de Prestação Continuada de Assistência Social, com a intenção de também minimizar os furtos de energia.

Segundo Jamil e Ahmad (2019), o furto de energia elétrica pode não estar necessariamente relacionado à falta de capacidade de pagamento das famílias, mas sim a um problema de ação coletiva. Isso significa que, se o furto de energia é algo comum em uma determinada área, as pessoas não se sentem mal em praticá-lo. A fim de enfrentar os problemas relacionados à inadimplência e ao furto de energia elétrica, que têm um impacto direto nas tarifas de energia e, por consequência, na capacidade de pagamento das pessoas, diversas famílias encontram-se em situações financeiras desafiadoras, o que as leva a buscar soluções como não pagar as contas ou recorrer ao furto de energia. É fundamental considerar medidas que promovam aprimoramentos na eficiência e na fiscalização do sistema elétrico.

3.4. A SITUAÇÃO ENERGÉTICA DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

O Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de número 1 é um dos objetivos da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que visa erradicar a pobreza extrema em todo o mundo, incluindo a redução pela metade da proporção de homens e mulheres vivendo na pobreza em todas as suas dimensões.

Segundo o Indicador 1.2.1 do ODS Brasil (2023), em 2020, a taxa de pobreza nacional era de 23,5% para homens e 24,8% para mulheres, indicando uma pequena diferença entre os gêneros. No entanto, é importante ressaltar que as regiões Norte e Nordeste do Brasil apresentam uma distribuição mais acentuada da pobreza, com taxas de 36,8% e 40,5%, respectivamente. Esses dados destacam a necessidade de considerar a questão de gênero ao implementar políticas e programas para combater a pobreza extrema até 2030.

Nesse contexto, é crucial reconhecer que as mulheres enfrentam desafios adicionais devido às responsabilidades domésticas, o que as torna mais dependentes do acesso à energia. A análise da Tabela 3 revela que a disparidade de gênero está presente em todos os estados da Amazônia Legal.

Tabela 3 - Proporção de horas diárias dedicadas aos cuidados de pessoas e/ou afazeres domésticos por sexo e idade na Amazônia Legal

Estado	Homens (Total)	Mulheres (Total)	Homens (14 a 29 anos)	Mulheres (14 a 29 anos)	Homens (30 a 49 anos)	Mulheres (30 a 49 anos)	Homens (50 a 59 anos)	Mulheres (50 a 59 anos)	Homens (60 anos ou mais)	Mulheres (60 anos ou mais)
Rondônia	5,5	11,6	4,7	10,5	5,8	12,4	6,5	13,2	5,6	10,4
Acre	5,6	11,6	5,0	10,6	6,1	12,4	6,3	13,3	5,6	10,2
Amazonas	4,9	9,4	4,2	8,5	5,2	10,1	5,6	10,1	5,2	9,0
Roraima	5,2	10,2	4,5	8,7	5,8	11,6	5,9	11,8	5,2	8,8
Pará	5,4	12,5	4,3	10,7	5,9	14,3	5,9	14	6,1	10,9
Amapá	6,4	9,6	5,7	8,3	7	10,8	6,8	10,5	6,1	9,4
Tocantins	5,3	10,6	4,3	9,7	5,5	11,4	6,2	11,8	6,1	9,8
Maranhão	4,5	11,2	3,7	9,7	5,0	12,7	5,2	13	4,6	9,9

Fonte: Elaboração própria a partir do indicador 5.4.1 (ODS Brasil, 2023).

Diante disso, ao planejar estratégias de erradicação da pobreza, é fundamental levar em consideração a distribuição regional da pobreza e considerar as necessidades específicas das mulheres, a fim de promover a igualdade de gênero e alcançar resultados efetivos.

O relatório anual de 2022 do Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA, 2022) destaca que, embora o acesso à energia elétrica não seja mencionado explicitamente como um direito fundamental na Constituição Federal, pode ser considerado como tal devido à importância para a dignidade humana. No entanto, ainda há uma parcela significativa da população brasileira sem acesso à eletricidade, especialmente na região da Amazônia, onde cerca de um milhão de pessoas vivem em situação de exclusão elétrica.

O estudo de Mazzone et al. (2021) aborda a multidimensionalidade da pobreza no Brasil, incluindo a questão da pobreza energética, e discute as políticas públicas de combate a essa problemática. Dentre os programas mencionados no estudo, destaca-se o Vale Gás/Auxílio Gás, que fornece botijões de gás para famílias de baixa renda em regiões remotas e de difícil acesso. Outro programa trata-se da incorporação do Auxílio Gás no Bolsa Família, que visa reduzir a vulnerabilidade energética das famílias beneficiárias do Programa. Há também a Tarifa Social de Energia Elétrica, que consiste em um desconto na conta de luz destinado a famílias de baixa renda que consomem até 220 kWh/mês. Todos esses programas são importantes para garantir o acesso à energia elétrica e ao gás para as famílias mais vulneráveis do país.

Além destes, em se tratando da situação de acesso à energia, como já foi abordado na seção 3.1 deste trabalho, tem- se os programas de universalização do acesso à energia elétrica, no caso, o Programa Luz Para Todos, assim como o Programa Mais Luz Amazônia. Ambos têm como objetivo levar energia elétrica para áreas rurais que ainda não foram alcançadas pela rede elétrica. Porém o Programa MLA é voltado exclusivamente para a região da Amazônia Legal.

Neste sentido, em 29 de junho de 2021, a ANEEL publicou as metas iniciais[1] do Programa MLA, onde inicialmente são previstas pouco mais de 210 mil ligações, vide Tabela 4.

Tabela 4 - Metas iniciais do Programa MLA

UF	Distribuidora	Meta
AC	Energisa Acre	17.000
AM	Amazonas Energia	33.000
AP	Companhia de Eletricidade do Amapá	2.524
MA	Equatorial Maranhão	1.825
MT	Energisa Mato Grosso	410
PA	Equatorial Pará	154.833
RO	Energisa Rondônia – antiga CERON	1.300
RR	Roraima Energia	7.743
TO	Energisa Tocantins	586
	Total	**210.221**

Fonte: ANEEL (2021).

[1] As metas iniciais para o Programa MLA têm caráter meramente indicativo, apenas para consolidar e sinalizar ao MME e à sociedade as demandas conhecidas pelas distribuidoras, considerando que os programas de obra devem ser submetidos para a análise do MME e da Eletrobras (Gomes, Varella e Vilela, 2022).

Corroborando com o que foi exposto, Ferreira e Silva (2021) afirma que na região da Amazônia Legal, a expansão das redes de distribuição ainda é o principal mecanismo para atender a população sem acesso aos serviços públicos de energia elétrica, e as distribuidoras de energia elétrica apresentam anualmente projeções de mercado de energia elétrica para aprovação do Ministério de Minas e Energia[2]. No entanto, em regiões remotas onde a densidade populacional é baixa e as restrições geográficas e ambientais impedem a extensão da rede, as comunidades não têm energia elétrica fornecida pelas distribuidoras ou possuem pequenos geradores não regulados pelo setor elétrico, e isso pode ter impactos econômicos e na qualidade de vida da população. Para essas regiões, a oferta de serviços públicos de energia elétrica deve ser viabilizada por meio de geração descentralizada de pequeno porte, como os sistemas autônomos de geração de eletricidade para universalização do acesso[3], no caso, os sistemas individuais de geração de energia elétrica (SIGFI) ou microssistemas isolados de geração (MIGDI).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base na pesquisa bibliográfica realizada sobre acesso à energia no Brasil, gênero, pobreza energética e a situação energética da Amazônia brasileira, foi possível identificar as interconexões entre esses temas e os impactos que têm na vida das pessoas. A literatura consultada evidencia que a pobreza energética é um problema que afeta principalmente a população de baixa renda e que o acesso à energia elétrica é essencial para a melhoria da qualidade de vida das pessoas. Além disso, a exclusão elétrica na Amazônia Legal é uma realidade para muitas pessoas que vivem em áreas remotas e de difícil acesso.

A análise também destacou a relação entre energia e gênero, mostrando que as mulheres são as mais afetadas pela falta de acesso à energia elétrica, devido à sua responsabilidade pelas tarefas domésticas e cuidados com a família. A literatura sugere que políticas públicas de energia devem levar em consideração as questões de gênero para garantir acesso equitativo à energia.

Para apresentar de forma mais clara os resultados encontrados na pesquisa bibliográfica, foi elaborada a Tabela 5, que consta os aspectos principais relacionados às temáticas: acesso à energia no Brasil, energia e gênero, pobreza energética, bem como a situação energética da Amazônia brasileira, assim como as recomendações para cada tema.

[2] Os programas LPT e MLA são opções de atendimento e Programas que contribuem para o cumprimento dos planos de universalização das distribuidoras de energia elétrica.

[3] Para fins de universalização do acesso à energia elétrica, desde 2004 foi permitido o uso de sistemas autônomos de geração a partir de fontes intermitentes de energia renovável como alternativa à extensão da rede elétrica, sejam do tipo individual ou coletivo (Gomes, Varella e Vilela, 2022).

Tabela 5 - Resultados pesquisa: Acesso à Energia no Brasil, Energia e Gênero, Pobreza Energética e a Situação da Amazônia Brasileira

Tema	Aspecto Principal	Recomendações
Acesso à energia no Brasil	Exclusão elétrica e desafios na universalização da energia elétrica.	1 - Ampliar o acesso à energia elétrica de forma sustentável, priorizando recursos para atender tanto o consumo residencial quanto as necessidades das atividades produtivas locais. 2 - Promover a utilização de fontes renováveis de energia para garantir o acesso à energia limpa e sustentável. 3- Estabelecer parcerias entre governo, setor privado e organizações da sociedade civil para viabilizar soluções de acesso à energia elétrica em comunidades excluídas.
Energia e Gênero	Desigualdades de gênero no acesso e uso da energia.	1 - Incluir a perspectiva de gênero nas políticas públicas de energia, considerando as desigualdades e barreiras que as mulheres enfrentam no acesso e uso da energia. 2 - Promover a inclusão das comunidades nas decisões sobre o uso da energia em suas regiões, garantindo que as mulheres tenham voz e participação ativa. 3 - Coletar dados desagregados por sexo para monitorar as desigualdades de gênero no acesso e uso da energia, permitindo uma análise mais precisa e embasada nas políticas de energia.
Pobreza energética	Abordagem abrangente para combater a pobreza energética, incluindo definição clara, medição adequada e medidas eficazes de combate à inadimplência e ao furto de energia elétrica.	1 - Adotar uma definição clara e abrangente de pobreza energética, considerando as dimensões físicas, tecnológicas e econômicas do acesso à energia. Isso ajudará a identificar e abordar adequadamente as necessidades dos indivíduos e famílias em situação de pobreza energética. 2 - Utilizar abordagens complementares de medição da pobreza energética, considerando os aspectos físicos, tecnológicos e econômicos do acesso à energia. Isso permitirá uma compreensão mais abrangente da pobreza energética e ajudará a identificar as áreas prioritárias para intervenção. 3 - Fortalecer a fiscalização e o combate à inadimplência e ao furto de energia elétrica, garantindo que as tarifas sejam justas e sustentáveis. Isso pode ser feito por meio de melhorias na eficiência e no controle do sistema elétrico, bem como pela conscientização e educação sobre as consequências dessas práticas ilegais. 4 - Implementar políticas públicas e programas de inclusão energética, como subsídios para a instalação de sistemas solares em comunidades de baixa renda e a criação de cooperativas de energia comunitárias.
Situação energética da Amazônia Brasileira	A necessidade de abordagens abrangentes para garantir o acesso à energia elétrica na região da Amazônia, considerando a distribuição regional da pobreza e a importância da igualdade de gênero.	1 - Fomentar o desenvolvimento de projetos sustentáveis de geração de energia, como usinas hidrelétricas de baixo impacto ambiental, incentivar a pesquisa em energias renováveis específicas para a região e promover a integração energética com outros estados. 2 - Explorar soluções descentralizadas, como sistemas individuais de geração de energia elétrica, para fornecer acesso à eletricidade em áreas de baixa densidade populacional e restrições geográficas. 3 - Fortalecer políticas públicas, como o Vale Gás/Auxílio Gás e a Tarifa Social de Energia Elétrica, para atender às necessidades de energia das famílias de baixa renda na Amazônia. 4 - Aumentar o investimento e a coordenação entre as instituições governamentais e os órgãos reguladores para melhorar a infraestrutura energética e garantir o acesso à energia para todas as comunidades da Amazônia brasileira.

Fonte: Elaboração Própria a partir das literaturas consultadas.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa bibliográfica realizada contribuiu para o entendimento da temática de acesso à energia, gênero e pobreza energética, mas também mostrou a escassez de estudos que relacionem diretamente esses conceitos no contexto brasileiro. É preciso que mais pesquisas sejam realizadas para que se possa entender melhor a relação entre esses temas e como eles afetam a população brasileira.

Através da Tabela 5 deste trabalho, mostrada na seção 4, foram destacadas algumas das questões importantes relacionadas à temática de acesso à energia no Brasil, energia e gênero, pobreza energética e a situação energética da Amazônia brasileira, como a falta de acesso à energia elétrica por parte de mulheres e de grupos mais vulnerabilizados, a desigualdade na distribuição de energia elétrica, e a dificuldade no pagamento das faturas de energia, dentre outras. Essas questões apontam para a importância de políticas públicas que busquem enfrentar a pobreza energética, especialmente nas regiões mais vulnerabilizadas do país. Além disso, é fundamental que as questões de gênero sejam levadas em consideração nos âmbitos das políticas energéticas, de modo a garantir o acesso equitativo à energia elétrica para todos, independentemente do gênero.

Foi possível concluir que a exclusão elétrica na Amazônia Legal é uma realidade que afeta uma grande parcela da população brasileira e deve ser tratada com a devida importância pelas políticas públicas de energia. Para isso, é necessário que haja uma articulação entre os órgãos governamentais e a sociedade civil para que sejam implementadas ações efetivas que permitam o acesso à energia elétrica e o pagamento das faturas de energia, garantindo assim a dignidade humana e o direito à energia como um bem público e social.

Diante disso, pode-se afirmar que o objetivo proposto foi alcançado, já que a pesquisa bibliográfica contribuiu para a compreensão da temática e permitiu relacioná-la com outras áreas de conhecimento, como a questão de gênero e a exclusão elétrica na Amazônia Legal. A falta de literatura sobre as relações entre gênero e energia também aponta para a importância de ampliar essa discussão e considerar as especificidades das mulheres e outros grupos vulnerabilizados no acesso à energia. Ademais, a exclusão elétrica na Amazônia Legal demonstra que apenas conectar à rede elétrica não é suficiente para garantir o acesso à energia. Portanto, é necessário implementar políticas públicas específicas que levem em consideração as particularidades dessa região, bem como questões de gênero, raça e classe no âmbito energético.

Como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se a realização de estudos de casos mais detalhados na região Amazônica, a fim de aprofundar a compreensão das questões de gênero e acesso à energia. Especificamente, seria interessante investigar a capacidade das famílias de baixa renda de pagar pelo acesso à energia, bem como avaliar a eficácia dos programas governamentais destinados a melhorar o acesso à energia na região. Além disso, seria importante fiscalizar melhor a implementação desses programas para garantir que as comunidades rurais e remotas estejam sendo atendidas de forma adequada. Outras áreas que podem ser exploradas incluem a relação entre pobreza energética e educação, saúde e empoderamento feminino. Espera-se que essas recomendações possam fornecer subsídios para a formulação de políticas públicas mais eficazes e equitativas para a região amazônica e, consequentemente, contribuir para o desenvolvimento sustentável da região.

REFERÊNCIAS

[1] Azevedo, T. M.; VARELLA, F. K. O. M.. Acesso à energia, gênero e pobreza energética. 2023. 10 f. TCC (Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharelado em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

[2] Bouzarovski, Stefan; Petrova, Saska. A global perspective on domestic energy deprivation: Overcoming the energy poverty–fuel poverty binary. Energy Research & Social Science, v. 10, p. 31-40, 2015.

[3] Brasil. Aneel. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução homologatória no 2.891, de 29 de junho de 2021. Homologa as metas iniciais do Programa Mais Luz para a Amazônia, de que trata o Decreto nº 10.221, de 05 de fevereiro de 2020 e dá outras providências. Brasília, 2021. 13p.

[4] Brasil. Decreto nº 8.892, de 27 de outubro de 2016. Institui a Comissão Nacional para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 out. 2016. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2016/Decreto/D8892.htm. Acesso em: 26 mar. 2023.

[5] Clancy, Joy S.; Skutsch, Margaret; Batchelor, Simon. The Gender-Energy-Poverty Nexus: Finding the energy to address gender concerns in development. DFID project CNTR998521, 2003.

[6] Danielsen, Katrine. Gender equality, women's rights and access to energy services. A paper presented to the Ministry of Foreign Affairs of Denmark, 2012.

[7] Day, R.; Walker, G.; Simcock, N. (2016). Conceptualising energy use and energy poverty using capabilities. Energy Policy.

[8] Ferreira, André Luís; Silva, Felipe Barcellos. Universalização do acesso ao serviço público de energia elétrica no Brasil: evolução recente e desafios para a Amazônia Legal. Revista Brasileira de Energia, v. 27, n. 3, p. 135-154, 2021.

[9] Gomes, Rodolfo Dourado Maia; Varella, Fabiana Karla De Oliveira Martins; Vilela, Izana Nadir Ribeiro. Universalização do acesso à eletricidade no Brasil: avaliação dos SIGFIs e MIGDIs. Relatório Final. International Energy Initiative. Campinas, 2022.

[10] González-Eguino, Mikel. Energy poverty: An overview. Renewable and sustainable energy reviews, v. 47, p. 377-385, 2015.

[11] Healy, Jonathan D. et al. Fuel poverty in Europe: a cross-country analysis using a new composite measurement. In: New Challenges for Energy Decision Makers, 26th IAEE International Conference, 2003. International Association for Energy Economics, 2003.

[12] Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA). Relatório anual 2022: IEMA, 2022. Disponível em: http://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2022/06/RelatorioAnual_IEMA_2022.pdf. Acesso em: 26 mar. 2023.

[13] Jamil, Faisal; Ahmad, Eatzaz. Policy considerations for limiting electricity theft in the developing countries. Energy policy, v. 129, p. 452-458, 2019.

[14] Mazzone, Antonella et al. A multidimensionalidade da pobreza no brasil: um olhar sobre as políticas públicas e desafios da pobreza energética. 2021.

[15] Ministério de Minas e Energia (MME). Programa de Eletrificação Rural. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt- br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2_of_programa-de-eletrificacao-rural/sobre-o-programa. Acesso em 27/10/2022.

[16] Ministério de Minas e Energia (MME). Programa luz para todos. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt- br/destaques/Programa%20Luz%20para%20Todos/sobre-o-programa. Acesso em: 27 out. 2022.

[17] Nussbaumer, Patrick; Bazilian, Morgan; Modi, Vijay. Measuring energy poverty: Focusing on what matters. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 1, p. 231-243, 2012.

[18] Ods Brasil. Indicador 1.2.1 - Proporção da população abaixo da linha de pobreza nacional. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/objetivo1/indicador121#. Acesso em: 27 mar. 2023.

[19] Ods Brasil. Objetivo 1 - Erradicação da pobreza. Indicador 1.1.1 - Proporção da população abaixo

da linha de pobreza internacional. Disponível em: https://odsbrasil.gov.br/objetivo1/indicador111. Acesso em: 26 mar. 2023.

[20] Ods Brasil. Objetivo 5: alcançar a igualdade de gênero e empoderar todas as mulheres e meninas. Indicador 5.4.1: Proporção de tempo gasto em trabalho doméstico não remunerado e cuidados, por sexo, idade e localização. Disponível em: Acesso em: 18 out. 2022.

[21] Oliveira Gomes, Giovanna & Saath, Kleverton & Piai, Juliani. (2020). Pobreza energética: relação entre consumo de energia elétrica, aspectos socioeconômicos e de gênero.

[22] Paiva, Juliani Chico Piai et al. Pobreza energética: um indicador baseado na capacidade de pagamento por serviços de energia elétrica no Brasil. 2019.

[23] Rachter, Laísa; Rocha, Rudi. Eletrificação rural, eletrodomésticos e oferta de trabalho feminino: Evidência para o Brasil.

[24] Revista Brasileira de Economia, v. 76, p. 92-134, 2022.

[25] Reddy, Amulya Kn et al. Energy and social issues. World energy assessment, p. 39-60, 2000.

[26] Ribeiro, Izana. et al. Planos Setoriais: Energia - Gênero e Clima | OC. [s.l.] Observatório do Clima, 18 nov. 2021. Disponível em: https://generoeclima.oc.eco.br/planos-setoriais-energia/. Acesso em: 18 out. 2022.

Capítulo 5

Panorama dos instrumentos regulatórios do Hidrogênio Verde no Brasil

Abdiel Jônatas Alves da Silva
Lara Carla Freitas Rodrigues
Mirelli Soares da Silva
Paulo Danton Félix da Costa
Pedro Victor de Sousa Albuquerque
Thamyrys Marques Azevedo
Fabiana Karla de Oliveira Martins Varella

Resumo: O avanço das mudanças climáticas causadas pela emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) vem, ao longo dos últimos anos, fomentando iniciativas pautadas na descarbonização da economia mundial. No âmbito internacional, instrumentos como o Acordo de Paris estabelecem metas para limitar o aquecimento global, impulsionando a transição energética. Sendo assim, dentre as soluções que se destacam, está o Hidrogênio Verde (H2V), por ser uma alternativa limpa e viável para diversos setores, como a indústria e o transporte. Nesse viés, o Brasil se apresenta como um potencial protagonista na produção de H2V, dada sua capacidade de gerar energia a partir de diversas fontes renováveis. Ainda assim, para que essa geração se torne realidade é necessário superar uma série de desafios, dentre eles a regulamentação da produção e transporte do H2V no país. Tendo isso em mente, o objetivo do presente trabalho é analisar o arcabouço regulatório do H2V no Brasil entre os anos de 2020 a 2024, identificando os principais documentos e instrumentos normativos que impactam o setor. Para isso, foi realizada uma pesquisa bibliográfica seguida de identificação documental, catalogação, compilação e análise dos dados seguindo a ordem cronológica do arcabouço regulatório. Por fim, este estudo evidencia a importância do avanço regulatório para o desenvolvimento do hidrogênio verde no Brasil, apontando os desafios que precisam ser superados para garantir o crescimento sustentável do hidrogênio verde no país.

Palavras-chave: hidrogênio verde, instrumentos regulatórios, marco regulatório do hidrogênio verde.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, um esforço em conjunto tem sido feito para elaborar soluções que levem a descarbonização da economia mundial, com o objetivo de reduzir a emissão dos Gases precursores do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera e, como consequência, diminuir as mudanças climáticas que vem ameaçando a continuidade da existência humana, devido ao grande desequilíbrio causado pelo aquecimento global em decorrência da emissão dos GEE [1].

Neste contexto, diversas conferências foram realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) entre diversos países, a fim de firmar acordos multilaterais para avançar no combate às mudanças climáticas. Dentre estes acordos, encontra-se o Acordo de Paris, celebrado em 2015, que estabeleceu como meta limitar o aquecimento global abaixo dos 2ºC, sendo 1,5 ºC o cenário mais adequado até o fim do século [2].

A fim de atingir este objetivo, algumas ações vêm sendo discutidas, tais como a viabilização da transição energética segura e ambientalmente sustentável. Apesar disso, tal processo é considerado complexo, com variações de estágio e de ritmo das transformações em diferentes países, regiões ou localidades.

Neste contexto, segundo [3], o hidrogênio tem ganhado projeção como solução energética, podendo ser empregado, por exemplo, nos setores de transporte e industrial.

Dentre as principais rotas de produção de hidrogênio, encontra-se a produção do hidrogênio verde obtido a partir das fontes renováveis de energia (eólica, solar ou hídrica) através da eletrólise da água. Entre outras rotas existentes, esta é considerada a mais limpa por ser livre de emissões. O Plano Nacional de Energia 2050 [4] também afirma que dentre as alternativas para produção de hidrogênio, a rota verde é considerada como a de maior relevância internacional e o Brasil é reconhecido mundialmente como um potencial grande player nesse novo sistema energético.

Além disso, o interesse em hidrogênio eletrolítico tem tido considerável crescimento nos últimos anos, e segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), isso se deve à redução dos custos da eletricidade renovável, em particular da energia solar fotovoltaica e eólica. Ainda segundo [5], a região do Nordeste brasileiro, incluindo o Rio Grande do Norte (RN), tem se posicionado como um polo produtor de H2V, pois possui alto potencial para geração de energia eólica e solar, e seus portos estão geograficamente bem localizados em relação aos principais mercados da Europa.

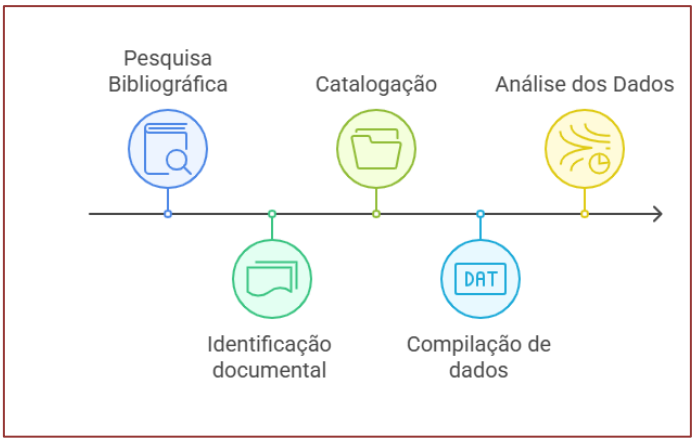
Por todo o exposto, fica evidente a relevância do H2V como ferramenta de mitigação da emissão dos GEE uma realidade, porém para que a produção deste combustível seja possível, é necessário superar alguns desafios, entre eles estão o transporte, armazenamento e distribuição do produto, como também os instrumentos regulatórios [6].

Tendo esse último desafio como foco, o presente estudo tem como objetivo identificar e analisar documentos que tratem sobre o andamento do arcabouço regulatório do H2V no Brasil entre os anos de 2020 a 2024. Para isto, o artigo está organizado em quatro seções, incluindo esta introdução. No segundo tópico, serão apresentados os materiais e métodos utilizados para a estruturação do trabalho. No terceiro, descreve-se os principais instrumentos regulatórios em ordem cronológica que envolvem o H2V. Por fim, a quarta e última seção, que trata sobre as considerações finais do contexto atual do panorama brasileiro, assim como as perspectivas e desafios para o melhor desenvolvimento dos instrumentos regulatórios de H2V no Brasil.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos deste estudo, foi realizada uma revisão bibliográfica da literatura sobre a regulamentação brasileira que trata do estágio regulatório do Hidrogênio Verde no Brasil. A metodologia utilizada neste trabalho seguiu as cinco etapas mostradas na Figura 1.

Figura 1. Etapas da pesquisa Etapas da metodologia



Fonte: autoria própria

Tais etapas desenvolvidas no trabalho, conforme mostrado na Figura 1, são assim detalhadas:

1. Pesquisa bibliográfica: esta primeira etapa refere-se à busca do arcabouço regulatório, relatórios e outros documentos relevantes para a pesquisa. As fontes de pesquisa utilizadas foram na obtenção de dados disponibilizados pelos Órgãos competentes que regem o setor de energia elétrica do Brasil.
2. Identificação documental: a segunda etapa envolveu a leitura e a análise crítica dos documentos selecionados. Foram identificados os principais conceitos e argumentos apresentados em cada documento e como eles se relacionavam.
3. Catalogação: na terceira etapa, os documentos foram selecionados com base em critérios de inclusão e exclusão, tais como relevância para o assunto em questão, data de publicação e qualidade metodológica, sendo dispostos em ordem cronológica.
4. Compilação de dados: esta quarta etapa envolveu a descrição de cada documento em sua devida ordem cronológica.
5. Análise de dados: na quinta e última etapa, os dados foram descritos e examinados criticamente.

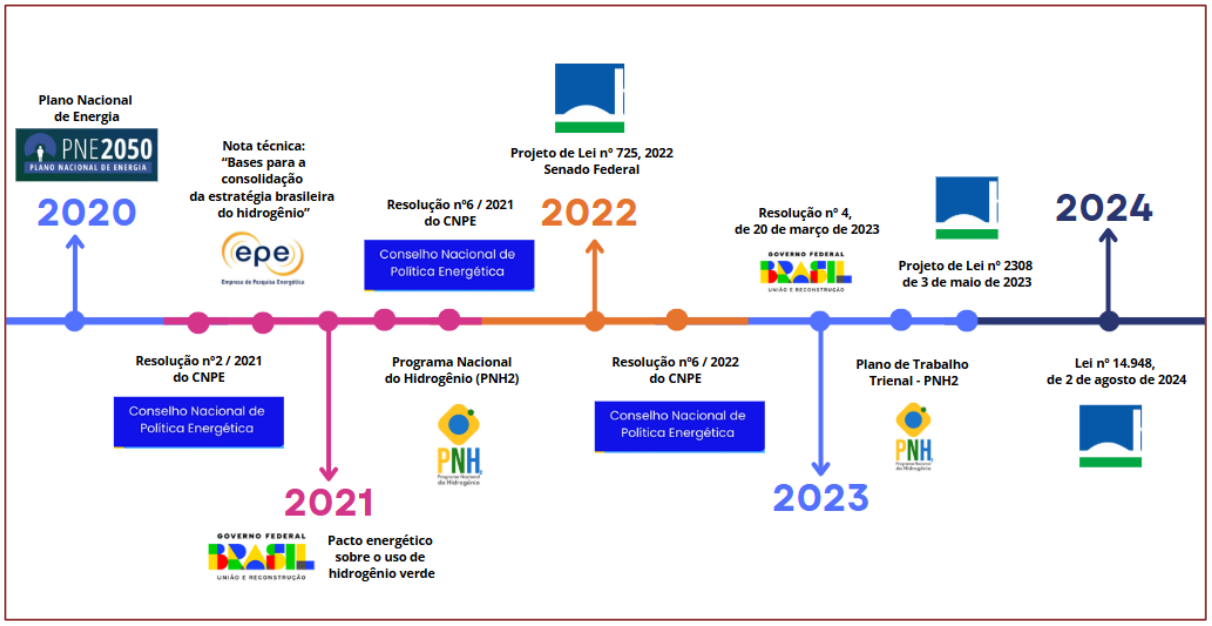
3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Esta seção apresenta o levantamento dos principais instrumentos regulatórios relacionados ao Hidrogênio Verde no Brasil, organizados por ano e classificados de acordo com sua natureza, como planos nacionais de energia, resoluções do Conselho Nacional de

Política Energética (CNPE), notas técnicas e projetos de lei atualmente existentes. O objetivo é reunir e sistematizar estas normativas proporcionando uma visão geral sobre o desenvolvimento do marco regulatório do hidrogênio no país.

Os subtópicos listados na seção 3.1 incluem regulamentações desde o ano de 2020 até 2024, evidenciando a evolução das diretrizes governamentais. Além da descrição textual, a Figura 2 mostra um resumo destes marcos regulatórios, representando um modelo de linha do tempo.

Figura 2. Linha do Tempo dos Instrumentos Regulatórios do Hidrogênio Verde no Brasil (período 2020-2024)



Fonte: autoria própria

3.1. INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS: ANO DE 2020

No ano de 2020 iniciou-se a preocupação por uma transição energética mais limpa e eficiente quanto a mitigar os efeitos climáticos provenientes da emissão de carbono. Com isso, a inserção do Hidrogênio na matriz energética brasileira se mostrou como uma solução alternativa.

3.1.1. PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050

Elaborado a partir das diversas características e cenários da transição energética [4], publicado em 16 de dezembro de 2020, tem como objetivo auxiliar no planejamento da expansão do setor de energia do país, levando em consideração possíveis mudanças causadas por tecnologias disruptivas, como o hidrogênio. Nesse contexto, o PNE 2050 destaca o importante papel do hidrogênio e dos combustíveis à base de hidrogênio como alternativa para impulsionar a economia de baixo carbono.

Para além disso, o plano enfatiza as principais rotas de produção do hidrogênio, por exemplo, via gás natural (hidrogênio cinza) que constitui o meio mais barato, porém

poluente devido a emissão de gases do efeito estufa. Como também, por meio de fontes renováveis via eletrólise (hidrogênio verde), a forma mais limpa e mais cara, comparado ao custo de produção do hidrogênio cinza. Ademais, o PNE 2050 sugere que é necessário investir e elaborar a necessária normatização para a produção do hidrogênio, baseada no que já é bem reconhecido internacionalmente no que diz respeito a medição, equipamentos de geração a base de hidrogênio, normas de segurança e entre outros aspectos.

3.2. INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS: ANO DE 2021

Após a publicação do PNE 2050, no ano de 2021, houve uma expressiva movimentação no que tange a publicação de resoluções, notas técnicas e estudos a respeito do hidrogênio, principalmente o de baixa emissão de carbono, a primeira dessas resoluções foi a nº 2 do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE).

3.2.1. RESOLUÇÃO Nº2 / 2021 DO CNPE

Publicada em 10 de fevereiro de 2021, [7] estabeleceu, dentre outras coisas, orientações para a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), sobre a disposição dos seus recursos para o desenvolvimento de pesquisa e inovação no setor de energia centradas em alguns temas, dentre eles o hidrogênio. Além disso, determinou um prazo de 60 dias para que o Ministério de Minas e Energia avaliar, junto ao Ministério da Economia, a possibilidade e forma de destinação dos recursos de pesquisa para a Empresa de Pesquisa Energética (EPE).

3.2.2. NOTA TÉCNICA: "BASES PARA A CONSOLIDAÇÃO DA ESTRATÉGIA BRASILEIRA DO HIDROGÊNIO"

Posteriormente, em 23 de fevereiro de 2021, a EPE publicou [8], tendo como objetivo abordar pontos importantes para a construção da estratégia brasileira no hidrogênio, trazendo aspectos conceituais e fundamentais. O estudo realizou um panorama da indústria do hidrogênio, os desafios, evoluções tecnológicas, custos, estratégias e um levantamento histórico acerca das ações nacionais voltadas ao desenvolvimento do hidrogênio. Em sua conclusão, sugeriu que a pesquisa e produção do hidrogênio não deve se limitar a um único tipo, deve-se adotar uma estratégia de Hidrogênio "Arco-íris", levando em conta a diversidade de recursos energéticos do país e a possibilidade de barateamento de formas de produção que ainda hoje são mais caras, como a do hidrogênio verde, sendo essa abordagem mais consistente e promissora para a descarbonização dos sistemas energéticos do país.

3.2.3. PACTO ENERGÉTICO SOBRE O USO DE HIDROGÊNIO VERDE

No final do mês de junho do ano de 2021, o Brasil participou do Fórum Ministerial do Diálogo em Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia. Neste evento virtual, o governo brasileiro anunciou dois pactos energéticos governamentais, energy compacts, compromissos voluntários no âmbito de biocombustíveis e hidrogênio, com a finalidade

na contribuição nacional para acelerar o cumprimento das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7, que tem relação com o uso universal de energias limpas.

No pacto energético sobre o uso de hidrogênio verde, o foco está voltado para auxiliar a consolidação da economia do H2 no Brasil, por meio da alocação de recursos para políticas de pesquisa, desenvolvimento e inovação. Ademais, o programa buscava estimular a capacitação e treinamento das pessoas, estabelecendo uma plataforma digital para estruturar dados e informações sobre o setor de hidrogênio no território brasileiro. Junto ao governo, grandes empresas brasileiras, como Itaipu Binacional, estão empenhadas nas discussões acerca do Diálogo de Alto Nível sobre Energia e consideram a adoção de pactos energéticos próprios [9].

3.2.4. RESOLUÇÃO N°6 / 2021 DO CNPE

Em 20 de abril do mesmo ano, foi lançada a Resolução n°6/2021 pelo CNPE. Tal Resolução determinava ao Ministério de Minas e Energia, num prazo de até 60 dias, deveria apresentar propostas de diretrizes para o Programa Nacional de Hidrogênio. A Resolução ainda trata sobre o interesse em desenvolver o mercado de hidrogênio no Brasil, a cooperação internacional para o avanço tecnológico, a diversidade da aplicação do hidrogênio na economia, entre outros. Vale mencionar que no ano de 2022, a Resolução n°6/2021 foi revisada de acordo com [10].

3.2.5. PROGRAMA NACIONAL DO HIDROGÊNIO (PNH2)

Em 2021, o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) foi instituído com o objetivo de fortalecer o mercado e a indústria do hidrogênio no Brasil. Este Programa foi concebido como um esforço coordenado para potencializar as capacidades do país no desenvolvimento e na utilização do hidrogênio, alinhando-se às tendências globais de transição energética e ao compromisso do Brasil com uma economia de baixo carbono.

Além do exposto, [11] delineia eixos que guiarão as ações do programa, como o fortalecimento das bases científico-tecnológicas, capacitação de recursos humanos, planejamento energético, arcabouço legal e regulatório-normativo, abertura e crescimento do mercado e competitividade, e cooperação internacional. Cada um desses eixos foca em aspectos críticos para o desenvolvimento do hidrogênio no Brasil.

Logo, o PNH2 está estruturado em seis eixos temáticos, conforme mostrado na Tabela 1, que aborda aspectos necessários para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no país.

Tabela 1. Eixos do PNH2

Eixo	Descrição
Fortalecimento das Bases Científico-tecnológicas	Mapeamento de investimentos e iniciativas, identificação de instituições, superação de desafios e apoio à pesquisa e desenvolvimento.
Capacitação de Recursos Humanos	Capacitação técnica e profissional, desenvolvimento de currículos acadêmicos e intercâmbio entre setores.
Planejamento Energético	Estudos de demanda e oferta e mapeamento de estruturas geológicas.
Arcabouço Legal e Regulatório-Normativo	Mapeamento das legislações existentes, criação de normativos e cooperação entre Agências Reguladoras.
Abertura e Crescimento do mercado e Competitividade	Mapeamento da cadeia de valor e avaliação de aspectos tributários.
Cooperação Internacional	Diálogo internacional e atração de investimentos estrangeiros.

Fonte: Adaptado de PNH2 (2021).

O Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio foi criado através de [10], e ficou responsável por coordenar as ações e diretrizes do PNH2. Este comitê é considerado fundamental para promover a colaboração entre diferentes ministérios, agências reguladoras e a indústria, assegurando uma abordagem integrada e multidisciplinar.

3.3. INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS: ANO DE 2022

No ano de 2022, foi publicado o Projeto de lei nº 725 e houve uma atualização da Resolução n°6 do CNPE, ambos com importantes iniciativas que têm impacto não só nacional, mas também internacional e global no que se refere à produção e comercialização internacional do hidrogênio produzido no Brasil.

3.3.1. PROJETO DE LEI N° 725[1]

O projeto de Lei n° 725, conforme [12], foi estabelecido no ano de 2022, onde são definidos os mecanismos necessários para a inserção do hidrogênio como um componente central no setor energético brasileiro, com o objetivo de incentivar o uso do hidrogênio sustentável e promover a transição para uma economia de baixo carbono. A iniciativa prevê a modificação de legislações existentes, como, por exemplo, a Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, para adequar o arcabouço jurídico às novas demandas tecnológicas e ambientais.

O Art. 1º da Lei nº 9.478 é alterado para incluir o hidrogênio como vetor energético, reforçando sua importância na transição energética e consolidando sua produção nacional de forma competitiva e sustentável. A introdução desse elemento no sistema energético visa tanto atender às metas de mitigar as mudanças climáticas quanto aumentar a competitividade do Brasil no cenário internacional.

[1] A subseção "3.3.1. Projeto de Lei n° 725" teve como referência [12].

No Art. 6º da referida Lei, são definidos os termos "hidrogênio" e "hidrogênio sustentável". O primeiro refere-se ao hidrogênio puro, obtido em condições normais de temperatura e pressão, seja a partir de fontes diversas, por meio de processos técnicos específicos, ou como subproduto de processos industriais. Já o segundo conceito, de "hidrogênio sustentável", descreve aquele que é produzido por fontes de energia renovável, como solar, eólica, biomassas, biogás e hidráulica, em consonância com a busca por fontes mais limpas e renováveis de energia.

O projeto também atualiza o Art. 8º da Lei nº 9.478, que agora inclui a regulação, autorização e fiscalização de toda a cadeia do hidrogênio. Isso abrange a produção, importação, exportação, armazenamento e estocagem do hidrogênio, bem como a criação de padrões para seu uso e injeção nos pontos de entrega ou saída dos sistemas de transporte de gás.

Além disso, a Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999, sofreria uma alteração a respeito da inclusão do inciso IV ao Art. 1º, que estabelece que a produção, importação, exportação, armazenamento e estocagem do hidrogênio também estarão sob regulação, incluindo padrões para sua injeção nos sistemas de distribuição de gás.

Outro ponto importante do referido projeto de lei, se refere ao Art. 4º, que trata da adição obrigatória de hidrogênio nos gasodutos de transporte. Sugere-se que a partir de 1º de janeiro de 2032, os gasodutos deverão conter no mínimo 5% de hidrogênio em volume, dos quais 60% deve ser hidrogênio sustentável. Este percentual subirá para 10% a partir de 1º de janeiro de 2050, com um mínimo de 80% de hidrogênio sustentável. Ainda prevê a possibilidade de escalonamento desses percentuais, respeitando a capacidade de segurança de transporte e abastecimento dos gasodutos.

Por fim, o Art. 5º estabelece que a lei entrará em vigor na data de sua publicação, o que permitirá a implementação imediata das diretrizes propostas para promover o uso do hidrogênio sustentável no Brasil.

3.3.2. RESOLUÇÃO N°6 / 2022 DO CNPE

Através da Resolução n°6 / 2021 do CNPE, que instituiu o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), estabelecendo um marco regulatório para o desenvolvimento da economia do hidrogênio no Brasil. Seu principal objetivo é criar bases para a produção, transporte, armazenamento e uso do hidrogênio como vetor energético, com ênfase na transição para fontes sustentáveis.

Uma das diretrizes centrais do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) é a organização da governança por meio do Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio (Coges-PNH2), composto por representantes de diversos ministérios e entidades do setor energético. O Coges-PNH2 tem a função de coordenar a implementação das ações estratégicas do programa, além de definir metas e acompanhar a evolução do mercado de hidrogênio no país.

A Resolução n°6 sofreu uma atualização em 2022 [13] para ampliar a estrutura do programa e garantir maior integração com políticas de descarbonização e desenvolvimento sustentável. Entre as principais mudanças, destaca-se a definição mais clara dos eixos estratégicos do PNH2, que incluem: aprimoramento regulatório, capacitação tecnológica, incentivo à pesquisa e desenvolvimento, atração de

investimentos e fortalecimento da participação brasileira no mercado global de hidrogênio.

Outro ponto relevante de [13] é a inclusão de diretrizes para a certificação do hidrogênio com base em critérios ambientais, garantindo que o Brasil esteja alinhado às exigências internacionais para a exportação do chamado "hidrogênio verde". Além disso, a resolução reforça a necessidade de incentivos para a produção de hidrogênio a partir de fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa, consolidando o papel do Brasil como um potencial líder na transição energética global. Sua atualização foi essencial para que o país se encaixe e aproveite seu potencial na produção sustentável de hidrogênio e se posicione estrategicamente no cenário energético internacional.

3.4. INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS: ANO DE 2023

No ano de 2023, foram publicados alguns documentos, tais como a Resolução nº 4, o Plano de Trabalho Trienal - PNH2 e o Projeto de Lei nº 2308. Todos estes documentos abordam diferentes objetivos, sejam eles normativo, político, pesquisa, desenvolvimento e inovação no desenvolvimento de tecnologias de baixa emissão de carbono, além de propor um marco legal do Hidrogênio de baixa emissão de carbono no setor elétrico brasileiro.

3.4.1. RESOLUÇÃO Nº 4, DE 20 DE MARÇO DE 2023

Segundo [14], que foi implementada com a nova estrutura organizacional do Governo Federal, a Resolução nº 6/2022 foi alterada pela Resolução nº 4/2023 com o objetivo de refletir o atual cenário politico. No entanto, os atos normativos permaneceram inalterados.

3.4.2. PLANO DE TRABALHO TRIENAL - PNH2[2]

O Plano de Trabalho Trienal - PNH2, tratado em [15], tem como objetivo impulsionar o potencial do país para com o Hidrogênio, foi lançado pelo Ministério de Minas e Energia, com foco em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no desenvolvimento de tecnologias de baixa emissão de carbono, no que se referem a todas as suas formas de produção, inclusive o Hidrogênio Verde.

Outro ponto relevante acerca deste Plano de Trabalho, se refere ao fato deste documento contemplar cinco câmaras temáticas para delimitar as ações que serão realizadas no triênio de 2023 a 2025 para com o PNH2, conforme a Figura 3.

Como o instrumento é bastante extenso, o referido trabalho terá como foco a 4ª câmara, Arcabouço Legal e Regulatório-normativo, que consiste em remover barreiras contra investimentos no setor, considerando o alinhamento dos normativos nacionais com internacionais, inter relações entre setores e normas de segurança e usos tecnológicos.

[2] A subseção “3.4.2. Plano de Trabalho Trienal - PNH2” teve como referência [15].

Figura 3. Estrutura de governança estabelecida para o Programa Nacional do Hidrogênio (Plano Trienal 2023-2025) [15]

Conforme mostrado no PNH2, é fundamental identificar e propor a adequação da legislação necessária ao enquadramento de plantas de hidrogênio como projetos de infraestrutura, garantindo sua elegibilidade ao Regime Especial de Incentivos para o Desenvolvimento da Infraestrutura (REIDI). Além disso, o aperfeiçoamento de atos normativos é essencial para viabilizar incentivos já existentes, facilitando o avanço do mercado.

Portanto, este Plano de Trabalho Trienal estabelece os marcos temporais e as prioridades do Brasil para a estruturação da economia do hidrogênio. Neste cenário, para alcançar tais objetivos, foram estabelecidas ações prioritárias, dentre elas, a definição de um marco legal para o setor.

3.4.3. PROJETO DE LEI Nº 2308 DE 3 DE MAIO DE 2023

O Projeto de Lei (PL) nº 2308 propõe a inclusão das definições de "hidrogênio combustível" e "Hidrogênio Verde" na Política Energética Nacional (Lei nº 9478/1997). Além disso, institui o marco legal para o hidrogênio de baixa emissão de carbono, incentivando o uso de fontes renováveis para produção e fomentando a indústria desse combustível no Brasil.

Alguns dos principais tópicos abordados pelo PL nº 2308/2023 são mostrados na Tabela 2. Este PL busca estabelecer segurança jurídica e estabilidade regulatória, facilitando investimentos e desenvolvimento tecnológico. Sua aprovação (se tornando no ano de 2024, a Lei nº 14.948) consolida o Brasil no mercado global de energia limpa e de baixo carbono.

Tabela 2. Tópicos informativos gerais abordados pela PL nº 2308/2023

Tópico	*Descrição*
Definição de Hidrogênio Verde	O hidrogênio verde é um combustível limpo obtido por meio da eletrólise da água, utilizando energia de fontes renováveis (eólica, solar) para separar o hidrogênio do oxigênio.
Objetivos do Projeto	- Reduzir as emissões de gases de efeito estufa. - Contribuir para a transição energética. - Incentivar o desenvolvimento econômico sustentável.
Propostas Legislativas Principais	- Projetos de incentivos fiscais para a produção de hidrogênio verde. - Regulamentação sobre a infraestrutura de produção, distribuição e exportação.
Andamento Legislativo	- Projetos de Lei em discussão no Congresso para definir os marcos regulatórios. - Parcerias público-privadas para construção de usinas e hidrovias voltadas à exportação.
Incentivos	- Propostas de redução de impostos para empresas que investirem em hidrogênio verde. - Financiamento para pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias nesse setor.
Metas	- Aumentar a capacidade de produção de hidrogênio verde no Brasil. - Estabelecer o Brasil como um dos principais exportadores mundiais de hidrogênio verde.

Fonte: Adaptado de PL nº 2308/2023.

3.5. INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS: ANO DE 2024

Em 2024, houve a promulgação da Lei nº 14.948, originada a partir do Projeto de Lei nº 2308/2023, trazendo novas diretrizes para o setor de Hidrogênio no Brasil.

3.5.1. LEI Nº 14.948, DE 2 DE AGOSTO DE 2024[3]

A Lei nº 14.948 institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil, e foi implementada, conforme mostrado na subseção 3.4.3, a partir do Projeto de Lei nº 2308/2023, estabelecendo assim, a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNHBC). Seu objetivo é promover o uso e a produção de hidrogênio de baixa emissão como parte da transição energética nacional, além de fomentar o desenvolvimento sustentável e atrair investimentos para a infraestrutura e pesquisa tecnológica nesse setor.

Entre os instrumentos da referida Lei, destacam-se o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro) e o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC). Além disso, a lei prevê incentivos fiscais e regulatórios, e a criação de um comitê gestor para coordenar as diretrizes da política.

[3] A subseção "3.5.1. Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024" teve como referência [17].

Essas ações visam estimular a descarbonização da economia, promover a segurança energética e reduzir a dependência de insumos importados, como fertilizantes nitrogenados, ao mesmo tempo que protegem o meio ambiente e impulsionam o desenvolvimento da cadeia produtiva nacional.

Conforme a Lei nº 14.299/2022, que estabeleceu a Política Nacional de Hidrogênio no Brasil, a legislação visa estruturar e impulsionar a utilização do hidrogênio como um vetor estratégico para a transição energética do país. A Lei delineia a criação de um ambiente regulatório e institucional propício para o desenvolvimento de tecnologias de produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio, com foco no hidrogênio verde, aquele produzido a partir de fontes renováveis de energia. Este marco regulatório é essencial para o Brasil se posicionar como um líder global na economia do hidrogênio, um mercado emergente com enorme potencial de crescimento.

A Lei prevê, ainda, o incentivo à pesquisa, inovação e desenvolvimento de tecnologias, criando mecanismos que estimulem a cooperação entre os setores público e privado. A formação de profissionais qualificados para o setor também é um ponto central da legislação, com foco na educação e capacitação, a fim de garantir que o país tenha a mão de obra necessária para suportar o crescimento da indústria do hidrogênio. Nesse contexto, programas de capacitação e formação técnica são destacados, com apoio à implementação de centros de pesquisa e inovação voltados ao hidrogênio.

Outro aspecto fundamental da Lei nº 14.948 é o incentivo à instalação de infraestrutura necessária para a produção, transporte e armazenamento do hidrogênio, visando a viabilização de projetos de grande escala. Além disso, a legislação contempla a criação de um ambiente de mercado competitivo, com a implementação de políticas públicas de fomento, isenções fiscais e facilitação de investimentos. A Lei também define que o governo federal deverá criar um sistema de incentivos financeiros, incluindo subsídios e financiamento de projetos, além de promover parcerias internacionais para o intercâmbio de tecnologias e experiências.

A política de hidrogênio verde, definida por esta Lei, também busca contribuir para a descarbonização de setores chave da economia, como o transporte, a indústria e a geração de energia. A transição energética proposta pelo governo tem como objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa, alinhando o Brasil aos compromissos internacionais de sustentabilidade e mitigação das mudanças climáticas. A Lei, portanto, representa um passo significativo para a modernização da matriz energética brasileira, tornando o hidrogênio uma peça-chave na estratégia de descarbonização do país.

Além disso, a Lei nº 14.299/2022 determina a implementação de mecanismos de monitoramento, controle e avaliação das ações previstas, com vistas a garantir a eficiência e a efetividade das políticas públicas adotadas. A fiscalização será realizada por órgãos competentes, com a colaboração de entidades de pesquisa e organizações da sociedade civil, buscando a transparência e a boa aplicação dos recursos.

3.6. RESUMO DOS INSTRUMENTOS REGULATÓRIOS PERÍODO 2020 - 2024

O presente tópico mostra um resumo simplificado dos instrumentos regulatórios mostrados nas subseções 3.1 até 3.5. Sendo assim, a Tabela 3 ressalta os principais pontos tratados em tais subseções.

Tabela 3. Resumo dos instrumentos regulatórios de 2020 a 2024

Instrumento	Data	Descrição
Plano Nacional de Energia 2050	16 de Dezembro de 2020	Conjunto de pesquisas e orientações para a elaboração de uma estratégia de longo prazo voltada ao setor energético do Brasil.
Resolução nº 02 / 2021 do CNPE	09 de Março de 2021	Determina instruções sobre a pesquisa, desenvolvimento, investimento e inovação no setor energético do Brasil.
Pacto Energético sobre o uso de Hidrogênio Verde	23 de Fevereiro de 2021	Trata de conceitos essenciais e princípios fundamentais para o desenvolvimento da estratégia brasileira de hidrogênio.
Resolução nº 06/2021 do CNPE	20 de Abril de 2021	Determina a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio.
Pacto Energético para o Hidrogênio	24 de Junho de 2021	Mostra a participação do Brasil no Fórum Ministerial do Diálogo em Alto Nível das Nações Unidas sobre Energia, apresentando dois pactos energéticos governamentais, em biocombustíveis e hidrogênio.
Plano Nacional do Hidrogênio - PNH2	31 de Julho de 2021	Delineia eixos que guiarão as ações do programa para potencializar as capacidades do país no desenvolvimento e na utilização do hidrogênio, alinhando-se às tendências globais de transição energética.
Projeto de Lei n° 725/2022	28 de Março de 2022	Propõe mudanças necessárias em determinadas leis para a inserção do hidrogênio como um componente central no setor energético brasileiro.
Resolução n°06/2022 do CNPE	23 de Junho de 2022	Define de forma objetiva os eixos estratégicos do PNH2 e inclui uma diretriz para a certificação do hidrogênio com base em critérios ambientais, garantindo que o Brasil esteja alinhado às exigências internacionais.
Resolução n°04/2023 do CNPE	20 de Março de 2023	Altera a Resolução CNPE nº 6, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio e dá outras providências.
Plano de Trabalho Trienal - PNH2	23 de Agosto de 2023	Programa Nacional do Hidrogênio com objetivo de impulsionar o potencial do Brasil para com o Hidrogênio, com foco em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação no desenvolvimento de tecnologias.
Projeto de Lei n° 2308/2023	3 de Maio de 2023	Institui o marco legal para o hidrogênio de baixa emissão de carbono, incentivando o uso de fontes renováveis para produção de combustível no Brasil
Lei nº 14.948/2024	2 de Agosto de 2024	Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono; dispõe sobre a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono; institui incentivos para a indústria do hidrogênio de baixa emissão de carbono; institui o Regime Especial de Incentivos para a Produção de Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (Rehidro); cria o Programa de Desenvolvimento do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PHBC); e altera as Leis nºs 9.427, de 26 de dezembro de 1996, e 9.478, de 6 de agosto de 1997.

Fonte: Adaptado dos instrumentos regulatórios mencionados nas subseções de 3.1 até 3.5.

4. CONCLUSÃO

O presente estudo realizou uma análise abrangente sobre o arcabouço regulatório do hidrogênio no Brasil, com foco nas iniciativas relacionadas ao hidrogênio verde. Por meio de uma revisão bibliográfica e da sistematização das informações em diferentes etapas, foi possível observar avanços significativos nos últimos anos, principalmente com a elaboração de planos estratégicos, resoluções e projetos de lei que visam consolidar o hidrogênio como um componente essencial na transição energética do país.

Dentre os marcos mais relevantes, destacam-se o Plano Nacional de Energia 2050, o Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2) e o Projeto de Lei nº 725/2022, que contribuíram para o fortalecimento das bases científicas e tecnológicas, além de apontarem diretrizes para o desenvolvimento da economia do hidrogênio sustentável. O aprimoramento do arcabouço regulatório, iniciado com esses instrumentos, demonstra o crescente interesse em alinhar o Brasil às tendências globais de descarbonização e sustentabilidade.

No entanto, é evidente que a estrutura regulatória nacional ainda apresenta lacunas importantes. A regulamentação específica para o hidrogênio verde carece de maior detalhamento e harmonização com as normas internacionais. Questões como segurança jurídica, incentivos fiscais e a integração entre os setores energético e industrial ainda necessitam de maior atenção para fomentar investimentos e consolidar o país como protagonista global no mercado de hidrogênio sustentável.

Portanto, o desenvolvimento contínuo de um marco regulatório robusto e bem estruturado é imprescindível para garantir a competitividade do Brasil nesse setor estratégico. Investir em inovação, capacitação técnica e cooperação internacional, além de eliminar barreiras regulatórias, será determinante para transformar o potencial do hidrogênio em uma realidade econômica e ambiental concreta no país. Assim, este estudo contribui ao evidenciar a importância do avanço regulatório como base para o crescimento sustentável do hidrogênio no Brasil, apontando desafios que merecem atenção nas próximas etapas do desenvolvimento desse setor.

REFERÊNCIAS

[1] BEZERRA, Francisco Diniz. Hidrogênio verde: nasce um gigante no setor de energia. 2021.

[2] MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES - MCTIC (Brasil). Acordo de Paris. MCTIC,2021. Disponível em:https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/acordo-de-paris-e-ndc/arquivos/pdf/acordo_paris.pdf. Acesso em: 20 jan. 2025.

[3] GESEL (Rio de Janeiro). Ufrj (org.). Perspectivas da Economia do Hidrogênio no Setor Energético Brasileiro: texto de discussão do setor elétrico. Texto de Discussão do Setor Elétrico. 2021. Disponível em: https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2022/06/39_castro_2021_07_14.pdf. Acesso em: 29 jan. 2025.

[4] PLANO NACIONAL DE ENERGIA 2050. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2020.

[5] OLIVEIRA, Rosana Cavalcante de (org.). Panorama do hidrogênio no Brasil: texto para discussão (td) 2787 : panorama do hidrogênio no brasil. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 10 maio 2024.

[6] CARVALHO, Julia Finamor; GARCIA, José Victor da Silva. Hidrogênio verde: estudo de caso do Brasil. 2022.

[7] MME. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 2, de 10 de fevereiro de 2021. Estabelece orientações sobre pesquisa, desenvolvimento e inovação no setor de energia do País. Brasília, 2021. 2p. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/arquivos/2021/resolucao-2-cnpe.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

[8] EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Bases para a Consolidação da Estratégia Brasileira de Hidrogênio. Nota Técnica. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-569/Hidroge%CC%82nio_23Fev2021NT%20(2).pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

[9] MME. Ministério de Minas e Energia. Brasil apresenta pactos energéticos em biocombustíveis e hidrogênio no Diálogo em Alto Nível da ONU sobre Energia. 23 de junho de 2021. Disponível onine: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/brasil-apresenta-pactos-energeticos-em-biocombustiveis-e-hidrogenio-no-dialogo-de-alto-nivel-da-onu-sobre-energia. Acesso em: 10 out. 2024.

[10] MME. Ministério de Minas e Energia. Resolução nº 6, de 20 de abril de 2021. Determina a realização de estudo para proposição de diretrizes para o Programa Nacional do Hidrogênio. Brasília, 2021. 10p. Disponível online: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/arquivos/2021/ResoluesCNPE6_2021.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

[11] BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Resolução nº 6, de 29 de junho de 2022. Institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio, e dá outras providências. Disponível online: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/Res62022.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

[12] BRASIL. Senado Federal. Projeto de Lei nº 725, de 2022. Disciplina a inserção do hidrogênio como fonte de energia no Brasil, e estabelece parâmetros de incentivo ao uso do hidrogênio sustentável. Disponível online: https://legis.senado.leg.br/sdleg-getter/documento?dm=9096609&ts=1699468504020&disposition=inline. Acesso em: 10 out. 2024.

[13] BRASIL. Arquivo Nacional. Resolução nº 6, de 23 de junho de 2022. Diário Oficial da União. Brasília, 23 de junho de 2022. Disponível online: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2022/Res62022.pdf. Acesso: 10 out. 2024.

[14] BRASIL. Arquivo Nacional. Resolução nº 4, de 20 de março de 2023. Altera a Resolução CNPE nº 6, que institui o Programa Nacional do Hidrogênio, cria o Comitê Gestor do Programa Nacional do Hidrogênio e dá outras providências. Diário Oficial da União. Brasília, 06 de abril de 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/conselhos-e-comites/cnpe/resolucoes-do-cnpe/2023/ResoluoCNPE4_2023.pdf. Acesso: 10 out. 2024.

[15] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). Plano de Trabalho Trienal 2023-2025 do Programa Nacional do Hidrogênio – PNH2. Brasília, DF: MME, 2023. O documento apresenta diretrizes, metas e ações para a consolidação do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil, incluindo estratégias para atração de investimentos, desenvolvimento tecnológico e marcos regulatórios. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/programa-nacional-do-hidrogenio-1/planodetrabalhotrienalpnh2.pdf. Acesso em: 02 out. 2024.

[16] BRASIL. Senado Federal. Projeto de Lei nº 2308, de 2023. Dispõe sobre a definição legal de hidrogênio combustível e de hidrogênio verde. Disponível online: https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2359608. Acesso em: 10 out. 2024. Acesso em: 10 out. 2024.

[17] BRASIL. Lei nº 14.948, de 2 de agosto de 2024. Institui o marco legal do hidrogênio de baixa emissão de carbono no Brasil e estabelece a Política Nacional do Hidrogênio de Baixa Emissão de Carbono (PNHBC). Disponível em: https://legis.senado.leg.br/norma/39410139/publicacao/39411540. Acesso em: 10 out. 2024.

Capítulo 6

Aplicação do perfil ILT (Injection Logging Tool) em poços injetores para gerenciamento de reservatórios

Marcus Vinicius Batista de Morais
Daniel Viana de Freitas
Jardel Dantas da Cunha
Antônio Robson Gurgel
Keila Regina Santana
Andréa Francisca Fernandes Barbosa

Resumo: A maior parte das reservas de petróleo estão localizadas em campos maduros, que representam dois terços da produção global. Isso demanda novas tecnologias para melhorar o gerenciamento dos reservatórios nos quais estão contidos. Campos maduros, definidos pela ANP como aqueles com mais de 25 anos de produção ou que já extraíram 70% do volume total, requerem intervenções para revitalizar a produção e gerar benefícios econômicos. Devido ao declínio natural, são necessárias intervenções, como workover, que podem englobar a implementação de tecnologias visando o incremento de produção e/ou gerenciamento dos reservatórios. Em 2021, o Rio Grande do Norte experimentou um aumento na produção após sete anos de queda, impulsionado por investimentos em intervenções de poços, resultando em maior arrecadação de royalties por parte do Estado. Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a implementação de tecnologias para gerenciamento de campos maduros na indústria do petróleo, focando na utilização do perfil ILT (*Injection Logging Tool)* em poços injetores, uma vez que a injeção combinada em um poço é uma prática comum para maximizar a injeção total de água enquanto aumenta a pressão do reservatório. A injeção seletiva exige uma ferramenta capaz de medir as contribuições em cada uma das zonas submetidas à injeção para entender o perfil de injetividade de um poço, entender as mudanças neste perfil de injeção e selecionar candidatos para workover e completações. Portanto, foi corrido o ILT no poço “A” e analisado o seu perfil de injeção. A partir da implementação do perfil ILT foi possível ratear a quantidade de fluido que estava sendo destinada a cada um dos diferentes reservatórios do poço, possibilitando também a identificação do tamponamento de um dos mandris de injeção.

1. INTRODUÇÃO

Os campos que marcaram o início da exploração e produção em terras brasileira, localizados principalmente nos estados da Bahia, Rio Grande do Norte e Espírito Santo, já alcançaram, em sua maioria, o seu pico de produção. Devido a este fato, alguns reservatórios destas regiões já estão em estado de maturidade, sendo necessária a ocorrência de intervenções visando retomar e até mesmo elevar os índices de produção, gerando ganhos financeiros e sociais para a economia local.

Segundo a ANP, no Estado do Rio Grande do Norte, por exemplo, no ano de 2021 houve um aumento da produção após sete anos em queda (2013-2020). Este aumento se deu pelos investimentos das novas operadoras em intervenções de estimulação de poços e um melhor gerenciamento dos reservatórios. Proporcional ao aumento de produção houve ainda um aumento da arrecadação de *royalties* por parte do Estado, fazendo com que a indústria de óleo e gás voltasse a ser a maior fonte de renda da região, sendo responsável por 48% das exportações totais do RN, levando em consideração o período compreendido entre janeiro e agosto de 2022.

A indústria do petróleo desempenha um papel crucial na economia global, fornecendo energia e matérias-primas essenciais para uma ampla gama de indústrias. No entanto, os campos de exploração de petróleo enfrentam uma série de desafios que comprometem a eficiência das operações e a sustentabilidade ambiental. Entre esses desafios estão a complexidade das formações geológicas, a heterogeneidade dos reservatórios, a movimentação inadequada de fluidos e a detecção precoce de problemas relacionados à integridade de poços. Esses fatores podem levar a perdas de produção, aumento dos custos operacionais e riscos ambientais significativos (Gan et al., 2024).

Neste contexto, ferramentas avançadas de perfilagem surgem como soluções indispensáveis para o monitoramento e análise de reservatórios. Dentre essas tecnologias, destaca-se a ILT (*Injection Logging Tool*), uma ferramenta de perfilagem projetada para avaliar a dinâmica de injeção de fluidos em reservatórios subterrâneos (Wang, 2023). A ferramenta ILT se diferencia por sua capacidade de fornecer dados detalhados e precisos sobre a distribuição de fluidos, comportamento do reservatório e condições operacionais, permitindo uma tomada de decisão mais assertiva e embasada (Denney, 2013).

A movimentação inadequada de fluidos em um reservatório pode resultar em diversos problemas, como áreas de injeção ineficientes, comunicação interzonas e *bypass* de óleo. A perfilagem ILT é projetada para mitigar esses problemas ao identificar com precisão as zonas de injeção e medir a distribuição de fluidos ao longo do poço (YANG et al., 2018). Isso é possível graças ao uso de sensores de alta precisão que capturam parâmetros críticos, como temperatura, pressão e fluxo dos fluidos. Esses dados são posteriormente analisados para identificar anomalias e propor ajustes nas estratégias de injeção, melhorando a eficiência operacional e maximizando a recuperação de hidrocarbonetos (Sadigov; Thiruvenkatanathan; Sheydayev, 2017).

Além disso, a ferramenta de perfilagem ILT desempenha um papel fundamental na detecção de problemas relacionados à integridade do poço, como falhas no revestimento ou obstruções. Ao fornecer uma análise detalhada das condições internas do poço, a ferramenta permite que os operadores identifiquem e corrijam problemas antes que eles se tornem críticos, reduzindo assim os custos associados a manutenções não planejadas e mitigando os riscos ambientais (Banack *et al*., 2019).

Em um setor onde as margens de lucro são cada vez mais pressionadas e a responsabilidade ambiental é uma prioridade crescente, esta técnica de perfilagem surge como uma solução tecnológica indispensável (Noble *et al*., 2020). Com sua capacidade de integrar dados de perfilagem e fornecer *insights* profundos sobre o comportamento do reservatório, a ferramenta não apenas otimiza os processos de injeção de fluidos, mas também contribui para a sustentabilidade e eficiência geral das operações petrolíferas. O uso de tecnologias como a ILT reflete o compromisso da indústria em buscar soluções inovadoras que equilibrem a exploração eficiente de recursos com a proteção do meio ambiente (Bhagavatula).

Com base nesses desafios e no potencial das soluções tecnológicas, este trabalho busca avaliar de forma detalhada a implementação de tecnologias inovadoras para gerenciamento de reservatórios em campos de petróleo. A análise foca em avaliar o perfil de injeção de um poço injetor localizado no Estado do Rio Grande do Norte, utilizando a ferramenta ILT como um recurso essencial para alcançar esses objetivos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. ENGENHARIA DE RESERVATÓRIOS

Um reservatório de petróleo é um meio poroso saturado por hidrocarbonetos, formado pela decomposição de matéria orgânica em rochas geradoras, como folhelhos. Ele é composto por rochas-reservatório, geralmente porosas e permeáveis, que armazenam petróleo em volumes significativos (Brennan; Schwartz, 1985). Os principais tipos de rochas-reservatório são arenitos (50%), carbonatos (40%, como nos campos de Enxova e Pampo) e folhelhos (10%).

De modo geral, poços perfurados em carbonatos apresentam altas vazões iniciais, mas tendem a ter um período de produção mais curto em comparação com poços em arenitos. Para que a rocha-reservatório consiga reter o petróleo, é necessário que ele não migre para camadas mais superficiais. Isso requer a presença de rochas capeadoras ou selantes, caracterizadas por permeabilidades extremamente baixas, que atuam como barreiras, formando armadilhas estruturais criadas por falhas selantes, domos salinos ou anticlinais (Ahmed et al., 2009).

De modo geral, poços perfurados em carbonatos apresentam altas vazões iniciais, mas tendem a ter um período de produção mais curto em comparação com poços em arenitos. Para que a rocha-reservatório consiga reter o petróleo, é necessário que ele não migre para camadas mais superficiais. Isso requer a presença de rochas capeadoras ou selantes, caracterizadas por permeabilidades extremamente baixas, que atuam como barreiras, formando armadilhas estruturais criadas por falhas selantes, domos salinos ou anticlinais (Atkinson; Canter, 2011).

Na engenharia de reservatórios, é essencial compreender a estrutura geológica de um campo específico e suas propriedades físicas, dado o impacto dessas características no fluxo de fluidos dentro do reservatório e no comportamento mecânico das rochas. Esse entendimento é alcançado por meio da integração com a geologia, que fornece informações suficientes para a elaboração de um modelo. Esse modelo é utilizado para prever a produção e a resposta geomecânica do campo. Dentre as principais características do modelo, destacam-se: profundidade, comprimento, largura, espessura e limites, relacionados às características geométricas do campo (Bergamino et al., 2010).

Um aspecto fundamental relacionado à produção de petróleo e ao volume de óleo e gás extraído é que o reservatório está sujeito às forças exercidas pelo peso das rochas acima dele ("overburden"), às tensões laterais das rochas vizinhas ("sideburden"), além da pressão dos fluidos e da temperatura. Dessa forma, o reservatório opera sob a influência de gradientes hidrostático, geostático e geotérmico. Durante a produção, os fluidos do reservatório transitam das condições de pressão e temperatura do ambiente do reservatório para as condições existentes na superfície, o que pode provocar alterações de fase (Chen *et al*., 2011).

Os reservatórios podem ser classificados como sub-saturados, onde coexistem água e óleo com gás dissolvido (há saturação de gás, mas a produção na superfície inclui óleo e gás), ou saturados, caracterizados pela presença de água, óleo, e gás tanto dissolvido quanto em forma livre. O estado de saturação do reservatório está relacionado à pressão do ponto de bolha, que corresponde à pressão na qual o óleo começa a liberar a primeira bolha de gás (Goddijn-Murphy *et al*., 2009).

Quando a pressão do reservatório está abaixo da pressão do ponto de bolha, o sistema apresenta óleo, gás em forma livre e água, caracterizando um estado saturado, no qual ocorre transferência de massa apenas entre o óleo e o gás. Por outro lado, se a pressão do reservatório é superior à pressão do ponto de bolha, o reservatório é classificado como subsaturado (bifásico), contendo apenas duas fases imiscíveis: água e óleo. Esse conceito é utilizado no modelo *Black Oil* (Hadjimitsis; Clayton, 2011).

Os simuladores de reservatórios mais comuns focam no problema de fluxo multifásico, tratando o reservatório como um meio poroso saturado e utilizando diferentes abordagens, como o modelo *Black-Oil*, composicional, modelos bifásicos, entre outros. O modelo *Black-Oil* inclui as fases de água, óleo e gás, enquanto os modelos composicionais são aplicados principalmente para simulações de processos de recuperação terciária e para situações que envolvem problemas não isotérmicos (Hajhamad; Almasri, 2009).

Em problemas de fluxo multifásico, observa-se que a estrutura dos vazios no meio poroso pode ser muito estreita e sua conectividade tortuosa, o que pode causar interferências no regime de fluxo de fluidos (como água, óleo, gás, fluidos de injeção, entre outros) que preenchem e se movem por esses espaços. De maneira geral, mecanismos físicos, tanto em nível microscópico quanto macroscópico, podem restringir ou afetar o fluxo e a produção de água e hidrocarbonetos (Le *et al*., 2009).

Portanto, todos esses aspectos devem ser interpretados e analisados fisicamente, exigindo equações que representem cada um desses fenômenos. Dessa forma, o problema de fluxo multifásico em reservatórios de petróleo é solucionado por meio da resolução de equações derivadas de uma formulação matemática, que inclui equações de conservação de massa de fluido para cada componente do reservatório, aplicando relações constitutivas, equações que limitam a saturação dos fluidos e a pressão capilar como funções das fases, além das condições iniciais e de contorno.

2.2. PERFILAGEM DE POÇOS DE PETRÓLEO

Na exploração de petróleo, regiões potenciais com ocorrência de hidrocarbonetos podem ser identificadas por meio de mapeamentos sísmicos. Para validar as previsões obtidas por esses métodos de prospecção, dá-se início à perfuração de poços, criando um canal entre o reservatório e a superfície. Esse canal será utilizado posteriormente, durante a fase de produção, para o escoamento dos fluidos (Carvalho, 2015).

Após cada etapa da perfuração, é essencial realizar a caracterização das rochas perfuradas, identificando aquelas com capacidade de armazenar hidrocarbonetos. Essa etapa de análise e identificação de fluidos é conhecida como avaliação da formação, que envolve testes de formação e perfilagem de poços. A perfilagem, por sua vez, é o procedimento que fornece informações sobre as propriedades das rochas e dos fluidos, além de detalhes sobre a litologia e o diâmetro do poço em função da profundidade (Carvalho, 2015).

No setor petrolífero, a perfilagem destaca-se como uma das etapas mais essenciais e amplamente empregadas no processo de perfuração de poços, sendo realizada em praticamente todos os poços perfurados. Além disso, apresenta um custo relativamente baixo, representando, em casos extremos, até 5% do custo total de um poço (Chagas et al., 2011).

O perfil de um poço corresponde a uma representação visual, em função da profundidade, de uma ou mais propriedades ou características das rochas atravessadas durante a perfuração. Esses perfis são gerados por meio do deslocamento contínuo de uma sonda de perfilagem dentro do poço, com os dados sendo transmitidos por um cabo de perfilagem e coletados na unidade de superfície para análise (Thomas, 2004).

Na petrofísica, costuma-se utilizar os seguintes tipos de perfis de poço: caliper, potencial espontâneo, indução, gama natural, sônico, densidade e neurônico. A seleção do perfil mais adequado é determinada pelas necessidades específicas da empresa responsável pelo poço e pelos recursos financeiros disponíveis (Bustamante, 2012).

Segundo Thomas (2004), o perfil de caliper mede o diâmetro do poço, uma característica geométrica fundamental. Essa informação é utilizada para calcular o volume necessário de tampões e/ou cimento para o revestimento. Além disso, o caliper auxilia no controle de qualidade dos perfis, identificando áreas de *washout* (ampliação do poço) ou regiões com espessa formação de *mudcake* (depósito solidificado de fluido). Ele também desempenha um papel importante no suporte às operações de teste de formações.

O potencial espontâneo é um método que utiliza campos naturais, fundamentado no princípio de que, na ausência de um campo elétrico artificial, é possível detectar uma diferença de potencial entre dois eletrodos: um fixo na superfície e outro móvel inserido no poço. Esse fenômeno ocorre devido a atividades eletroquímicas ou mecânicas e é aplicado no cálculo da resistividade. A água subterrânea desempenha um papel crucial no mecanismo responsável pela geração dessa diferença de potencial (Gallas, 2005).

Os perfis de indução fundamentam-se no princípio da indução eletromagnética, conforme descrito pela Lei de Faraday. Essa lei explica a geração de correntes induzidas em materiais condutivos expostos a um campo magnético que varia no tempo. Na perfilagem, utiliza-se uma sonda equipada com duas bobinas coaxiais: uma responsável por gerar o campo magnético indutor e outra por medir a força eletromotriz resultante. Esse processo permite determinar a resistividade da formação (Ribeiro et al., 2015).

Os perfis de gama natural medem a intensidade da radiação gama emitida pelos solos e rochas ao longo do poço. Essa radiação provém de isótopos gerados pelo decaimento radioativo de elementos como urânio (U), tório (Th) e potássio (K). Por fornecer dados sobre a composição mineral, especialmente o teor de argila, esse perfil é classificado como litológico. Ele é particularmente útil para correlações entre poços, especialmente em sedimentos com camadas alternadas de arenitos e argilitos (Ribeiro *et al*., 2015).

O perfil de densidade é um registro contínuo que revela as variações na densidade das rochas atravessadas por um poço. Em matrizes porosas, ele mede tanto a densidade da matriz da rocha quanto a do fluido presente nos espaços porosos. Durante o processo, o poço é submetido a um bombardeamento de raios gama emitidos por uma fonte, geralmente Césio-137 (Cs-137) ou Cobalto-60 (Co-60), localizada dentro da ferramenta. Detectores acoplados ao mesmo equipamento captam o fluxo de raios gama dispersos pela formação, permitindo o cálculo da porosidade e a identificação de zonas contendo gás (Milner, 2017).

O perfil neurônico opera de forma semelhante ao perfil de densidade, envolvendo o bombardeamento da formação com partículas provenientes de uma fonte radioativa. Contudo, nesse caso, a fonte emite nêutrons, geralmente por meio de Amerício-241 combinado com Berílio (241Am-Be). Ao interagir com a matéria, os nêutrons colidem elasticamente e inelasticamente com os núcleos dos elementos presentes na rocha, sendo posteriormente dispersos e capturados pelos detectores instalados na ferramenta. O valor registrado pelo perfil neurônico reflete diretamente a quantidade de íons de hidrogênio, permitindo estimar a capacidade da rocha de armazenar fluidos, que é determinada por sua porosidade (Logelo, 2011).

2.3. INJEÇÃO DE ÁGUA

A injeção de água é amplamente utilizada na indústria como um dos métodos mais eficazes de recuperação de petróleo. Esse processo desempenha um papel fundamental em diversos planos de desenvolvimento de campos petrolíferos, possibilitando aumentos expressivos na recuperação total e podendo ser aplicado no reservatório já nas fases iniciais da produção (Gomes, 2003).

Segundo Singh e Kiel (1982) a injeção de água possui dois objetivos principais: (1) preservar a pressão do reservatório; (2) promover o deslocamento do óleo presente no meio poroso em direção aos poços produtores, aumentando assim sua recuperação. Além disso, Palsson et al. (2003) destacam que a aplicação da injeção de água para controlar a compactação da rocha e auxiliar o aquífero a manter condições de pressão ideais, garantindo a continuidade das vazões de produção.

O processo de injeção de água depende de diversos fatores, sendo os mais importantes: (1) a geologia da formação, que abrange as variáveis geológicas relacionadas às propriedades petrofísicas do reservatório (Rosa et al., 2006); (2) o planejamento do sistema de injeção, que considera a posição dos poços, as condições de operação e as características dos fluidos envolvidos (Sharma et al., 2000); e (3) a análise econômica do campo, destacando a relevância do gerenciamento de água e seus efeitos no desempenho do projeto e no comportamento dos reservatórios (Furtado *et al*., 2005).

A análise do desempenho dos processos de injeção de água é uma prioridade para engenheiros de reservatórios e empresas operadoras de campos petrolíferos, pois possibilita a definição de estratégias que otimizam a recuperação, aumentando o aproveitamento e o valor da água injetada nos reservatórios.

O cálculo da eficiência volumétrica de varredura (Evw) é um dos métodos mais utilizados para avaliar o desempenho da injeção de água. A metodologia proposta combina dados de produção com informações obtidas a partir de análises de fluidos, testemunhos e dados geológicos. Para essa determinação, são aplicados os princípios de balanço de materiais e a formulação de Cobb e Marek (1997), sendo o método validado em um caso real de campo.

Nos reservatórios naturalmente fraturados, a injeção de água apresenta desafios técnicos mais complexos em comparação aos reservatórios não fraturados. O principal desses desafios decorre da presença de fraturas, que podem influenciar significativamente o avanço da água injetada e, em casos críticos, provocar um "curto-circuito" entre os poços injetores e produtores. Isso resulta em consequências negativas para a recuperação, uma vez que o processo se limita à recirculação da água injetada. Como consequência, uma parte considerável do óleo presente na matriz não é deslocada para as fraturas, permanecendo no reservatório e reduzindo de forma significativa a eficiência do processo, que já é naturalmente inferior em comparação aos reservatórios não fraturados (Ligthelm *et al*., 2006).

A tecnologia de poços inteligentes e o monitoramento em tempo real têm se mostrado cada vez mais úteis para aumentar a eficiência dos processos de injeção de água. Thigpen et al. (2008) exploram diferentes abordagens para o controle em tempo real, tanto em nível de campo (global) quanto em nível de poço (local), avaliando a viabilidade de sua aplicação combinada. Al-Huthali et al. (2009) apresentam uma metodologia que integra o uso de válvulas inteligentes e algoritmos de otimização para controlar, em tempo real, os processos de injeção.

3. METODOLOGIA

O poço elencado para a aplicação da perfilagem ILT foi um poço que injeta em mais de um reservatório, porém não se conhece o volume real de injeção ao qual cada uma destas zonas está submetida.

Para que a operação com a ferramenta ILT possa ser realizada de maneira segura, antes da descida do BHA (*Bottom Hole Assembly)*[1] final de perfilagem é recomendado gabaritar o poço para que na sequência seja descido o BHA de teste, visando simular as condições operacionais no momento da corrida do perfil.

[1] Agrupamento de ferramentas que compõem o conjunto descido dentro do poço.

A operação de gabaritagem do poço “A” ocorreu conforme esperado, onde foram utilizadas as facas do modelo cachimbo e helicoidal de 48 mm (Figura 1), descidas pela unidade de *slickline*[2].

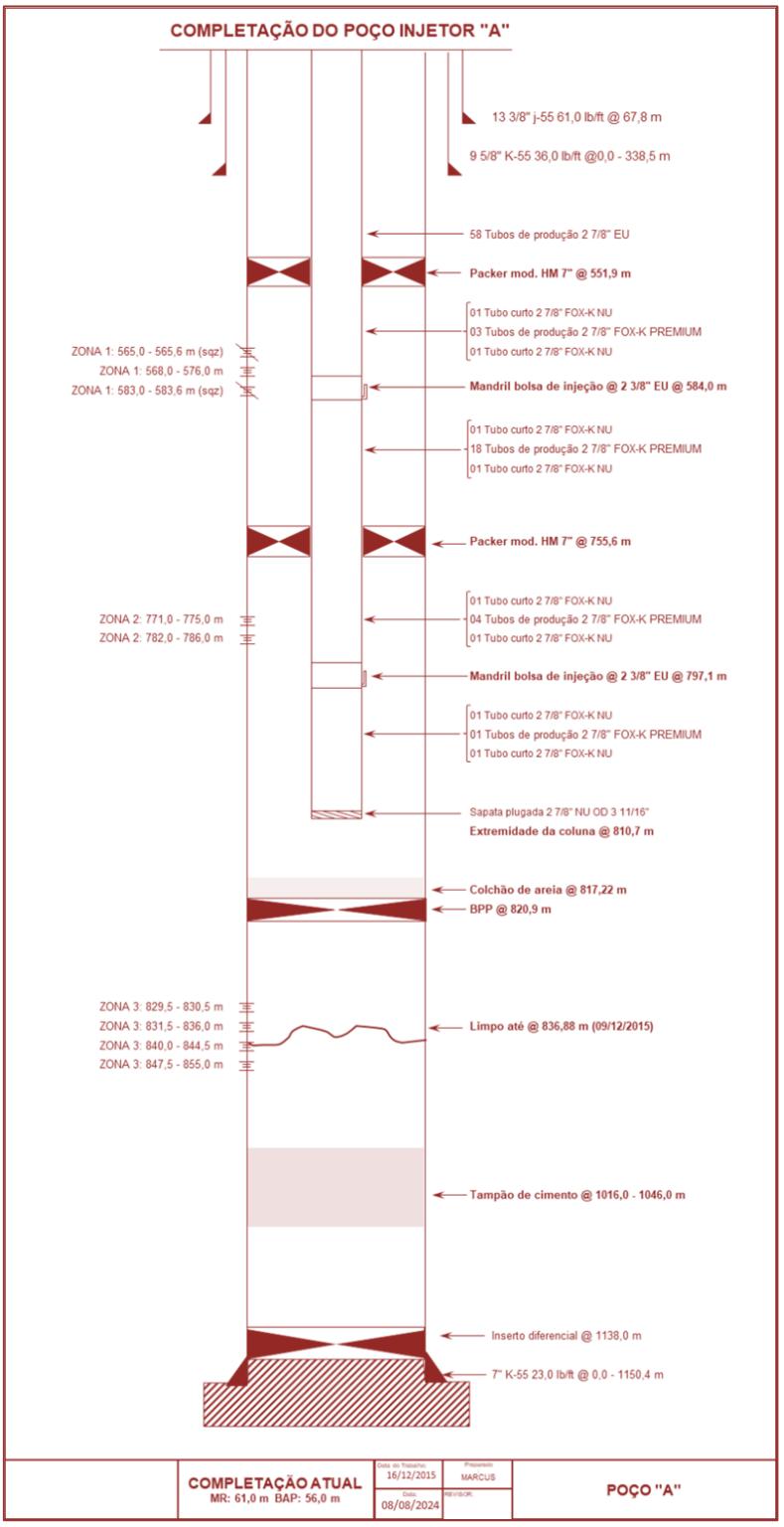
Figura 11: Faca helicoidal abaixo e cachimbo acima

Fonte: Autor, 2024.

Após isto, foi descido o BHA de teste, que é um conjunto de equipamentos que simulam as dimensões reais da ferramenta de perfilagem, visando confirmar a operacionalidade da coluna de injeção, coluna esta ilustrada na Figura 2.

[2] O cabo usado nessa operação é fino e não condutor de eletricidade. Ele é empregado para assentar e retirar equipamentos do poço, tais como plugues, válvulas e luvas e, também, para descer e retirar ferramentas e equipamentos de controle de vazão em poços.

Figura 12: Esquema mecânico do poço injetor "A"



Fonte: Autor, 2024.

Uma vez gabaritado e não identificado nenhuma restrição na coluna de injeção, foi possível descer o BHA de perfilagem, incluindo em sua composição sensores de pressão e

temperatura, sensores de GR/CCL, i*n-line spinner*, *continuous spinner* e centralizadores, conforme Figura 3:

Figura 3 - Ferramenta ILT com in-line e fullbore flowmeter

Fonte: Autor, 2024.

3.1. ESCOPO DO TESTE

3.1.1. FLUXO DINÂMICO, POÇO INJETANDO (1ª CORRIDA)

Iniciar descida do BHA, na velocidade de 20 m/min até a profundidade de 520,0 m, registrar a pressão de cabeça e vazão de injeção tanto no início quanto no final de cada corrida para garantir que o registro seja feito com os parâmetros estáveis. O procedimento consiste em descer a uma profundidade de 805,0 metros, permanecer por 5 minutos e após isto retornar a ferramenta a uma profundidade de 520,0 metros, permanecendo o mesmo intervalo de tempo. Esta etapa de descer a ferramenta, permanecer por 5 minutos, subir e permanecer novaente é realizado 3 vezes, variando a velocidade do cabo para 10 m/min, 20 m/min e 30 m/min.

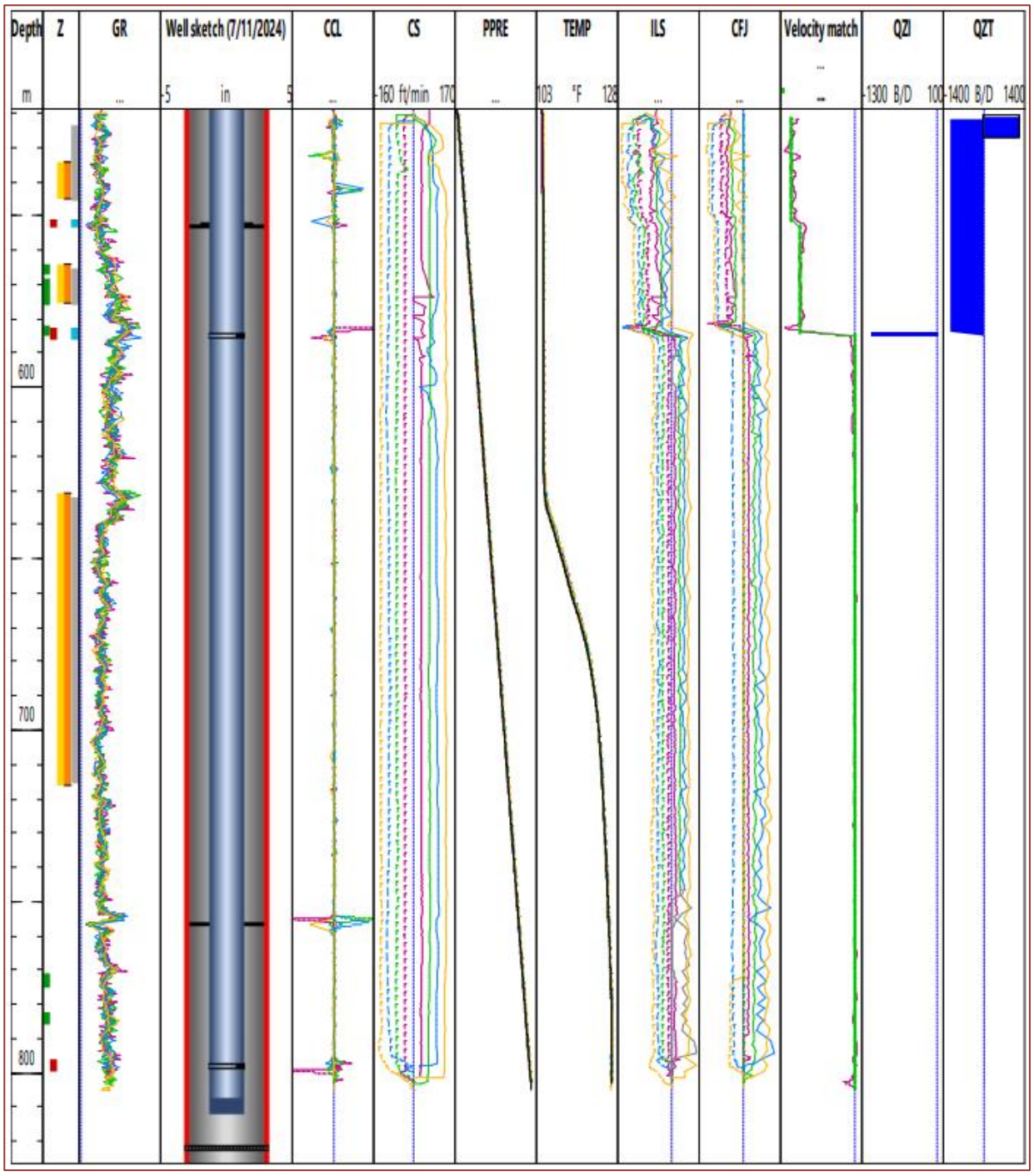
3.1.2. FLUXO ESTÁTICO, POÇO SEM INJETAR (2ª CORRIDA)

Após interromper a injeção do poço, deve-se aguardar 4 horas para iniciar as corridas com o fluxo estático. O procedimento consiste em uma série de descidas e subidas até 805,0 metros e retornos a 520,0 metros, mantendo-se em cada profundidade por 5 minutos. As velocidades variam entre 10 m/min, 20 m/min, 30 m/min e 40 m/min para as descidas e subidas. Por fim, há a instrução de recolher o BHA até a superfície a uma velocidade de 20 m/min.

4. RESULTADOS

Foi possível obter os dados para análise do perfil de injeção somente para o poço “A”, onde os resultados estão listados na figura 4.

Figura 4: Perfil de injeção do poço BR-21



Fonte: Autor, 2024.

A Figura 3 traz alguns *tracks*[3], que são basicamente alguns parâmetros analisados durante a interpretação dos dados adquiridos durante a perfilagem com ferramenta ILT, são eles:

- Na primeira coluna é possível observar a profundidade do poço, em metros;

[3] São as "pistas" ou colunas que compõem o documento de perfilagem.

- Na segunda coluna contém o parâmetro “z”, que deriva da palavra inglesa *zone*. Trechos coloridos podem ser vistos, onde em verde estão os intervalos com movimentação de fluido, vermelho representa os canhoneados, em amarelo as zonas de calibração do *spinner*, em laranja as zonas de aplicação dessas calibrações, em cinza são zonas definidas para análise, setadas acima e abaixo dos mandris, e por fim, em azul estão as chamadas zonas de entradas (algo próximo do tamanho do intervalo canhoneado, podendo ser menor para simular o tamponamento de algum deles);
- Na terceira coluna tem-se o perfil GR (*Gamma Rey*), utilizado para correlacionar os dados litológicos da formação através dos elementos radioativos naturais que emitem radiação gama de maneira espontânea;
- Na quarta coluna é esboçado o esquema mecânico do poço, incluindo as variações de diâmetros e equipamentos de coluna, em polegada;
- Na quinta coluna contém o perfil CCL (*Casing Collar Locators*), que indicam mudanças na espessura do metal ao longo da completação. O princípio físico do CCL é a lei de indução de Faraday;
- Na sexta coluna é possível observar as diferentes velocidades de descida da ferramenta no poço, em ft/minuto, identificado como CS (*Cable speed*). É possível encontrar também como LSPD (*line speed*);
- Na sétima e oitava coluna estão as pressões, em psi, e as temperaturas, em °F, respectivamente;
- Na nona e décima coluna estão os dados em rps adquiridos pelos medidores do BHA de perfilagem, ILS (*in-line spinner*) e CFJ (*contínuos flowmeter*), respectivamente;
- Na décima primeira pista pode-se observar o *match* da velocidade, que pode ser encontrada a partir da regressão linear de um gráfico entre ILS x CS ou por correlações matemáticas;
- Na décima segunda coluna é encontrada a vazão de injeção rateada nos mandris (QZI), em bbl/dia, e na décima terceira é observado a vazão total (QZT), também em bbl/dia.

Aplicação do perfil ILT no BR-21 possibilitou identificar a vazão de fluido injetado em cada um dos reservatórios, como mostrado na Tabela 1:

Tabela 2: Resultados associados ao perfil de injeção do poço "A"

MANDRIS (m)		CANHONEADOS		PRESSÃO (psi)	TEMPERATURA (°F)	Q total (m^3/d)	% dQ
M1	584	481 565 568 583	482 566 576 584	1901	105,1	182,6	100%
M2	797,1	771 782	775 786	2203	126,1	0	0%

Fonte: Autor, 2024.

A vazão de referência foi de 190,7 m^3/dia e a vazão calculada correspondente foi de 182,6 m^3/dia, onde foi notado que somente o primeiro mandril, referente ao pacote da Zona 1, estava recebendo injeção. No mandril inferior não foi identificado fluxo, ou seja, a Zona 2 não estava recebendo aporte de injeção como imaginávamos.

Isso significa que, ao invés de o poço está aportando água nos dois reservatórios, ele estava injetando todo o seu volume em somente uma das zonas. Em termos de recuperação secundária, isso impacta na manutenção da pressão de poros e no fator de recuperação da Zona 2, uma vez que está não estava recebendo injeção. Já na Zona 1, a injeção em alto volume a logo prazo, acarreta na sobrepressurização e antecipação da produção da água injetada, fenômeno este conhecido como *breakthrough*.

5. CONCLUSÕES

- A aplicação de tecnologias é fundamental para um melhor gerenciamento dos reservatórios, auxiliando na identificação de problemas de poço e melhorando o controle/rateio de injeção;
- A aplicação do perfil ILT no poço injetor "A" possibilitou a identificação do tamponamento do segundo mandril, como visto na coluna "QZT", da Figura 4;

REFERÊNCIAS

[1] AHMED, M. H.; EL LEITHY, B. M.; THOMPSON, J. R.; FLOWER, R. J.; RAMDANI, M.; AYACHE, F.; HASSAN, S.M. Application of remote sensing to site characterisation and environmental change analysis of North African coastal lagoons. **Hydrobiologia**, v. 622, p. 147-171, 2009.

[2] AL-HUTHALI, A; DATTA-GUPTA, A; YUEN, B; FONTANILLA, J. Field Applications of Waterflood Optimization via Optimal Rate Control with Smart Wells||. SPE 118948, In: SPE Reservoir Simulation Symposium. The Woodlands, Texas, EUA. Fevereiro 2-4, 2009.

[3] ATKINSON, S. F.; CANTER, L. W. Assessing the cumulative effects of projects using geographic information systems. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 31, n. 5, p. 457-464, 2011.

[4] BANACK, B.; BURKE, L. H.; BOOY, D.; CHINEME, E.; LASTIWKA, M.; GAVIRIA, F.; DEWJI, A. Characterization of Flow Control Device Performance with Distributed Fiber-Optic Sensors. In: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition**. SPE, 2019. p. D031S044R003.

[5] BERGAMINO, N.; HORION, S.; STENUITE, S.; CORNET, Y.; LOISELLE, S.; PLISNIER, P-D.; DESCY, J-P. Spatio-temporal dynamics of phytoplankton and primary production in Lake Tanganyika using a MODIS based bio-optical time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 114, n. 4, p. 772-780, 2010.

[6] BHAGAVATULA, R.; AL-AJMI, M. F.; AWAD, M. O.; RAJAGOPALAN, V. S.; EL-DAOUSHY, A. S.; HASSAN, M. O.; KARANTHARATH, R. An integrated downhole production logging suite for locating water sources in oil production wells. In: **SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition**. SPE, 2015. p. SPE-178112-MS.

[7] BRENNAN, M. J., SCHWARTZ, E. S. Evaluating natural resource investments. **Journal of Business**, v. 58, p. 135-57, 1985.

[8] BUSTAMANTE, S. G. H. Previsão de Medições Geofísicas: Pseudo-Poços. 204f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

[9] CARVALHO, C. N. Aplicação das Fontes Radioativas na Perfilagem de Poços e Aspectos de Radioproteção. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

[10] CHAGAS, E. S.; RUSSO, S. L.; SIMON, V. H. Geração de perfil sônico sintético em poços de petróleo através dos modelos de regressão não lineares usando a profundidade como variável regressora. **Scientia**

Plena, v. 6, 2011.

[11] CHEN, S.; FANG, L.; LI, H.; CHEN, W.; HUANG, W. Evaluation of a three-band model for estimating chlorophyll-a concentration in tidal reaches of the Pearl River Estuary, China. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 66, n. 3, p. 356-364, 2011.

[12] COBB, W; MAREK, F. Determination of Volumetric Sweep Efficiency in Mature Waterfloods Using Production Data‖. SPE 38902. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, Texas, EUA. Outubro 5-8, 1997.

[13] DENNEY, D. Implementation Challenges: DTS Injection Profiles in the Belridge Field, California. **Journal of Ptroleum Technology**, v. 65, n. 6, p. 120-123, 2013.

[14] FURTADO, C. J. A., SIQUEIRA, A. G., SOUZA, A. L. S., CORREA, A. C. F., MENDES, R. A. Produced Water Reinjection in Petrobras Fields: Challenges and Perspectives‖. SPE 94705. In: SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brasil, Junho 20-23, 2005.

[15] GALLAS, J. D. F. O método do potencial espontâneo (SP) - uma revisão sobre suas causas, seu uso histórico e suas aplicações atuais. **Revista Brasileira de Geofísica**. v. 23, n. 2, 2005.

[16] GAN, L.; DANG, L.; WANG, D.; WANG, Y.; CHEN, G.; LIU, Q.; DENG, R. Research on the processing and interpretation methods of distributed fiber optic vibration signal logging injection profiles. **Geoenergy Science and Engineering**, v. 239, n. 1, p. 1-22, 2024.

[17] GODDIJN-MURPHY, L.; DAILLOUX, D.; WHITE, M.; BOWERS, D. Fundamentals of in situ digital camera methodology for water quality monitoring of coast and ocean. **Sensors**, v. 9, n. 7, p. 5825-5843, 2009.

[18] GOMES, A. C. de A. Efeitos do Fluxo Bifásico e da Compressibilidade no Declínio da Injetividade nos Poços Injetores de Água‖, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Macaé, Brasil, 2003.

[19] HADJIMITSIS, D.G.; CLAYTON, C. Field spectroscopy for assisting water quality monitoring and assessment in water treatment reservoirs using atmospheric corrected satellite remotely sensed imagery. **Remote Sensing**, v. 3, n. 2, p. 362-377, 2011.

[20] HAJHAMAD, L.; ALMASRI, M.N. Assessment of nitrate contamination of groundwater using lumped-parameter models. **Environmental Modelling and Software**, v. 24, p. 1073-1087, 2009.

[21] LE, C. F.; LI, Y. M.; ZHA, Y.; SUN, D. Y.; HUANG, C. C.; LU, H. A four-band semi-analytical model for estimating chlorophyll-a in highly turbid lakes: the case of Taihu Lake, China. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, n. 6, p. 1175-1182, 2009.

[22] LIGTHEIM, D., Van den HOEK, P., HOS, P., FABER, M., ROETERDINK, R. Improved Oil Recovery in Fractured Carbonate Reservoirs: Don't Give Induced Fractures a Chance‖. SPE 98386, In: SPE Europec/EAGE Annual Conference and Exhibition. Viena, Áustria. Junho 12-15, 2006.

[23] LOGELO, C. B. Cálculo da porosidade do reservatório de namorado utilizando a perfilagem geofísica. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

[24] MILNER, J.; KOY, E. J. M.; GREE, R.; HARRIS, F.; ALEKSANDROWICZ, L.; AGRAWAL, A. Projected health effects of realistic dietary changes to address freshwater constraints in India: a modelling study. **The Lancet Planetary Health**, v. 1, n. 1, p. 26–32. 2017.

[25] NOBLE, L.; LANGNES, T.; THIRUVENKATANATHAN, P.; JONES, C.; FLETCHER, S.; SAISBHAN, A.; ALI, J. M. Well Integrity Flow Detection Using Novel Acoustic Pattern Recognition Algorithms. In: **Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference**. SPE, 2020.

[26] PALSSON, B., DAVIES, D., TODD, A., SOMERVILLE, J. A Holistic Review of the Water Injection Process‖. SPE 82224, In: SPE European Formation Damage Conference. Haia, Holanda. Maio 13-14, 2003.

[27] RIBEIRO, A. F.; MENDONÇA, C. A.; BUORO, A. B. Perfilagem indução eletromagnética e radiação gama natural em poços de monitoramento. In: 14 TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

[28] ROSA, A. J., CARVALHO, R. S., XAVIER, J. A. D. Engenharia de Reservatórios de Petróleo, Ed. Interciência, 2006.

[29] SADIGOV, T.; THIRUVENKATANATHAN, P.; SHEYDAYEV, A. Aplicação da tecnologia DAS de sensoriamento acústico distribuído na identificação e remediação de zonas produtoras de areia na conclusão do OHGP. In: **Conferência Técnica Anual do Cáspio da SPE**. SPE, 2017.

[30] SHARMA, M. M., PANG, S., WENNBERG, K.E., MORGENTHALER, L. N. Injectivity Decline in Water-Injection Wells: An Offshore Gulf of Mexico Case Study‖. In: SPE Production and Facilities Vol. 15, No. 1, p. 6–13. Fevereiro, 2000.

[31] SINGH, S. P., KIEL, O. G. Waterflood Design (Pattern, Rate, and Timing) - SPE 10024, In: SPE International Petroleum Exhibition and Technical Symposium. Beijing, China. Março 18-26, 1982

[32] THIGPEN, B., SAKOWSKI, S., WANG, X., LIU, X., LEE, J. Active Management of Five Spot Waterflood Based on Continuous Reservoir Monitoring. SPE 115725, In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Denver, Colorado, EUA. Setembro 21-24, 2008.

[33] THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. Rio de Janeiro. Editora Interciência, PETROBRAS. 2004.

[34] WANG, Yi. **Research on Distributed Fiber Optic Vibration Signal Logging Data Processing Method and Production Prediction**. 2023. Tese de Doutorado. Yangtze University.

[35] YANG, J.; LIAN, H.; LIANG, W.; NGUYEN, V. P.; CHEN, Y. Experimental investigation of the effects of supercritical carbon dioxide on fracture toughness of bituminous coals. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 107, p. 233-242, 2018.

Capítulo 7

Potenciais impactos ambientais da disposição de lodos de estações de tratamento de águas em solos

Juscimara Rodrigues Silva
Ana Carolina Brants Menezes
Fabiana Alves Fiore Pinto

Resumo: A adequação da água para abastecimento humano, ocorre nas estações de tratamento de águas e acarreta geração de resíduos denominados lodos de ETAs (LETAs). No Basil existem requisitos legais que determinam a destinação ambientalmente correta dos LETAs, todavia, grande parte desses resíduos ainda é lançada in natura. Neste contexto, o objetivo da pesquisa foi identificar os potenciais impactos ambientais da disposição dos LETAs em solos. Para identificação da percepção dos impactos ambientais relacionados à disposição dos LETAs, foi realizada uma pesquisa com especialistas. O questionário foi dividido em duas seções: uma relacionada ao uso benéfico dos LETAs em obras de solo e outra sobre a disposição final em aterros. A aplicação de uma análise estatística, com o uso do ChartExpo e da calculadora do método AHP, contribuiu para a quantificação e priorização dos impactos ambientais, destacando aqueles percebidos como mais relevantes por cada grupo. Profissionais do saneamento destacaram predominantemente os impactos positivos associados ao uso de LETAs, como a recuperação de solos degradados e o fornecimento de matéria orgânica. Suas prioridades também incluíram aspectos econômicos, como a geração de trabalho e renda. Em contraste, os pesquisadores avaliaram mais potenciais impactos negativos, como fitotoxidade e a presença de microorganismos patogênicos, além de questões ambientais, como alterações em habitats e perda de biodiversidade. Assim, pode-se concluir que ainda há uma lacuna no conhecimento sobre os impactos da disposição dos LETAs e que a temática demanda a realização de estudos e ampla divulgação para garantir que medidas preventivas sejam adotadas nas ETAs.

Palavras-chave: Disposição de LETAs, Impactos ambientais, Impactos do lodo, Resíduo sólido.

1. INTRODUÇÃO

O acesso humano à água em quantidade e qualidade para garantir a saúde e o gozo da vida é um direito universal ainda não assegurado e, por isso, ainda relacionado como um dos objetivos de desenvolvimento sustentável (Setti *et al*., 2001; UNDP – Siwi, 2021). A escassez econômica de água ainda vigente, principalmente nos países não desenvolvidos, é dependente da disponibilidade hídrica dos territórios e da infraestrutura para acesso ao recurso (Iwmi, 2007).

Dentre as fontes utilizadas para o abastecimento humano estão as águas superficiais que são de fácil captação, mas que contêm poluentes decorrentes dos usos e ocupação da bacia hidrográfica de contribuição (Fiore *et al*, 2020). Consideradas as características do ciclo hidrológico, é mister afirmar que as águas superficiais são as principais receptoras de poluentes, uma vez que: os poluentes lançados na superfície são carreados para os pontos de menor declividade onde ocorrem as águas superficiais; os poluentes emitidos na atmosfera alcançam os corpos d'água diretamente ou por meio da deposição úmida e dos escoamentos superficiais; os contaminantes dispostos no subsolo percolam e alcançam as águas subterrâneas e são elas que garantem a perenidade dos fluxos de águas na superfície.

A remoção de carga poluidora de águas superficiais para adequação ao consumo humano ocorre nas estações de tratamento de águas e, em geral, acarreta geração sazonal e heterogênea de resíduos denominados lodos de ETAs. Esses resíduos, para além dos contaminantes presentes nas águas brutas, também contém os elementos presentes nos insumos da potabilização das águas e do tratamento prévio dos LETAs que é realizado na unidade geradora tais como: os coagulantes que garantem os processos de floculação e decantação e os polímeros utilizados na etapa de desaguamento dos LETAs (Fiore *et al*., 2022). Os LETAs são compostos por elementos orgânicos e inorgânicos, principalmente Fe, Al, Mn e Cu, mas também podem conter poluentes persistentes e microrganismos patogênicos (Ackah *et al.*, 2018; Chen *et al*., 2019; Ullmann *et al*., 2019).

A geração diária de LETAs no Brasil é da ordem de 260 a 800 mil m^3 e decorre da operação de estações que adequa a qualidade das águas captadas com vistas ao abastecimento público das áreas urbanas. No país, esses lodos são classificados como resíduos reversos não perigosos, provenientes dos serviços públicos de saneamento básico, com responsabilidade de manejo atribuída ao agente gerador. No território existem requisitos legais que determinam a obrigatoriedade da destinação ambientalmente correta, no entanto, grande parte desses resíduos ainda é lançada *in natura* nos cursos d'água, acarretando significativo impacto ambiental (Brasil, 2010; Brasil, 2020).

Na atualidade, a prática regularmente aceita no Brasil para a destinação dos LETAs é a disposição final que em geral ocorre nos aterros sanitários, em conjunto com os resíduos sólidos urbanos. Estima-se que os custos do manejo adequado desses lodos representem de 20 a 60% dos custos operacionais das ETAs. Considerada a disposição inadequada vigente e os altos custos de aterramento, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas no país com o objetivo de potencializar a mudança do atual cenário de degradação. Essas pesquisas evidenciam a viabilidade técnica de uso benéfico desses resíduos para a construção civil em obras de solos ou para a fabricação de produtos cerâmicos e em concreto (Boscov *et al*., 2021; Fiore *et al.*, 2022; Santos e Campos, 2018). No entanto, segundo Urban, Lima e Morita (2019), as pesquisas sobre essa destinação ainda são realizadas em escalas laboratoriais e sem estudo dos potenciais impactos ambientais e econômicos.

Os impactos ambientais da disposição de LETAs diretamente em solos, seja em aterros ou obras de terra, ainda são pouco estudados. No entanto, a imobilização de fósforo em solos, a imobilização de metais e a recuperação de áreas degradadas são benefícios reportados pela aplicação de LETAs em solos alcalinos (Koopmans *et al*., 2020; Arab *et al.*, 2020; Ackah *et al*., 2018; Howells *et al*., 2018).

Alvarenga et al. (2018) fez uso do LETA para correção do solo afetado pelas atividades da mineração e concluiu que a presença de matéria orgânica nos LETAs os torna potenciais corretivos para remediação de solos degradados pela mineração, pois corrige a acidez e reduz a fração de metal extraível (adsorção de metais). Ainda segundo os autores, se aplicado juntamente com cal, o LETA permite a redução da ecotoxicidade do solo da mina. Os LETAs também podem ser utilizados como adsorventes e meio de cultivo nos solos, e mostrou estímulo à germinação e crescimento de sementes de trigo (Zhang *et al*., 2021).

O estudo de Benlalla *et al.* (2014) testou a calagem do lodo em diferentes concentrações, para aumento de seu valor agrônomo. A calagem permitiu a estabilização da matéria orgânica e o aumento do pH e viabilizou o aumento do nível de cálcio. Os resultados demonstraram que os LETAs da área de estudo apresentaram características agronômicas adequadas para o espalhamento agrícola. O uso sustentável do LETA para aplicações geotécnicas também vem apresentando alta aplicabilidade. Dohim *et al.* (2019) fez uso do LETA para desenvolvimento de geopolímeros livres de cimento comum. Boscov *et al.* (2021) estudou a aplicação do LETA, misturado com cal, solo ou pó de rocha para aplicações geotécnicas, analisando propriedades geotécnicas como permeabilidade, resistência ao cisalhamento etc., e verificaram que algumas misturas têm viabilidade técnica para serem usadas como coberturas diárias e intermediárias de aterros de resíduos. Fiore *et al*. (2022) identificou o potencial técnico de substituição de solos naturais por LETAs, em até 50%, para a construção de base e sub-base de rodovias.

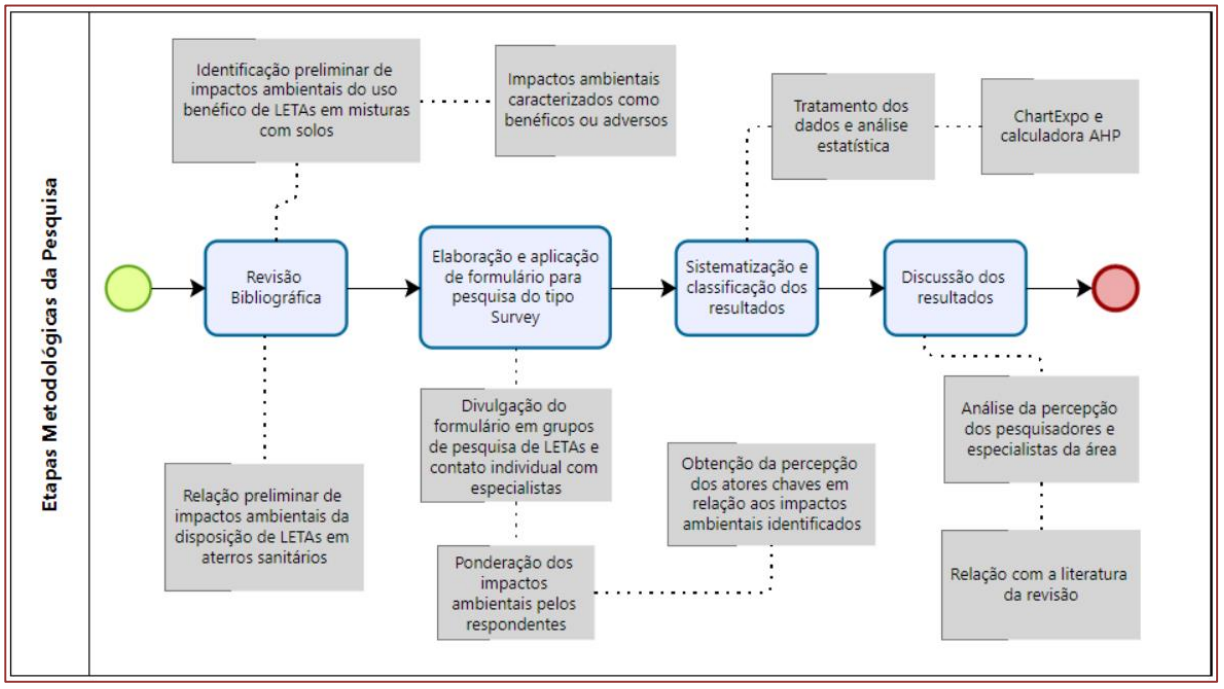
A despeito da viabilidade técnica de aplicações de lodo em solos, esses resíduos só contribuirão para a economia circular, caso também sejam comprovadas as viabilidades ambiental e econômica de produção e uso. Em vista disso, são demandados estudos químicos, bioquímicos e ecotoxicológicos, principalmente para as soluções que prevêem a aplicação em solos agrícolas, em que há contato direto com plantios. O teor orgânico do lodo, juntamente com as altas temperaturas do verão, resulta no aumento da atividade dos microrganismos do lodo, podendo causar poluição biológica (Rankovic *et al.,* 2020). Para o controle das comunidades biológicas, deve-se realizar o controle dos nutrientes e ferro na água bruta (XU *et al*., 2018). O uso de diferentes tipos de radiação ionizante na inativação de microrganismos em LETA também vem sendo estudado. De acordo com Liu *et al.*, (2018), a melhor gestão de resíduos de tratamento de água potável na remediação ambiental deve ser baseada na compreensão abrangente da eficácia e do risco dos LETAs.

No Brasil, inexistem instrumentos legais específicos que abordem os requisitos de caracterização que potencializam a aplicação de LETAs. No entanto, em 2022, o estado do Rio Grande do Sul publicou regulamentação sobre a temática, definindo critérios e procedimentos para o uso de LETAs e seus produtos derivados em solos desse Estado. A resolução considera que o uso dos LETAs em solos é uma alternativa que apresenta vantagens econômicas e ambientais quando comparado a outras práticas de destinação final (Consema, 2022). É no contexto de identificação de múltiplas aplicabilidades para os LETAs em solos e da precariedade de discussões e regulamentações brasileiras referentes à temática que essa pesquisa foi conduzida, com o objetivo de mapear e classificar os principais impactos ambientais da disposição de LETAs em solos e comparar as perspectivas de pesquisadores e profissionais do saneamento.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta é uma pesquisa exploratória subsidiada por dados quanti-qualitativos para a realização de classificações comparativas (Lakatos, 2021). Para sua realização foram executadas as etapas apresentadas no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Etapas metodológicas executadas para a realização da pesquisa



Para a identificação preliminar de potenciais impactos ambientais do uso benéfico de lodos de ETAs em misturas com solos, foi realizada revisão da literatura nos bancos de dados *Scopus* e *Scielo* para obtenção de estudos de casos sobre a temática, nos últimos 7 anos. Para tal, foram utilizadas as palavras chaves: lodo de ETA, tratamento de água, lodo e viabilidade técnica de uso de lodo. Somou-se a esse banco de dados publicações oriundas de dissertações, teses e livros vinculados às universidades públicas brasileiras. Após exclusão das sobreposições, foi realizada análise de relevância e convergência com a temática. Os trabalhos selecionados foram sistematizados e deles foram extraídos os usos benéficos referidos pelos autores e os impactos ambientais identificados. Os potenciais impactos ambientais foram categorizados como benéficos ou adversos. A relação preliminar de potenciais impactos ambientais da disposição dos LETAs em aterros foi subsidiada pelo Termo de Referência para licenciamento de aterro sanitário da CETESB (CETESB, 2019).

Para identificação da percepção dos atores sociais em relação aos potenciais impactos ambientais relacionados à deposição de LETA em solo, foi realizada uma pesquisa do tipo *Survey* (Groves *et al*., 2009), com especialistas da área de saneamento, considerados os requisitos necessários ao levantamento de informações qualitativas sugeridos por Yin (2016). Para tal foi utilizado questionário estruturado, aplicado em plataforma *online* – *Forms* (Microsoft), onde os representantes do público-alvo da pesquisa foram convidados a ponderar os potenciais impactos ambientais listados e a descrever potenciais impactos adicionais, caso entendessem faltantes.

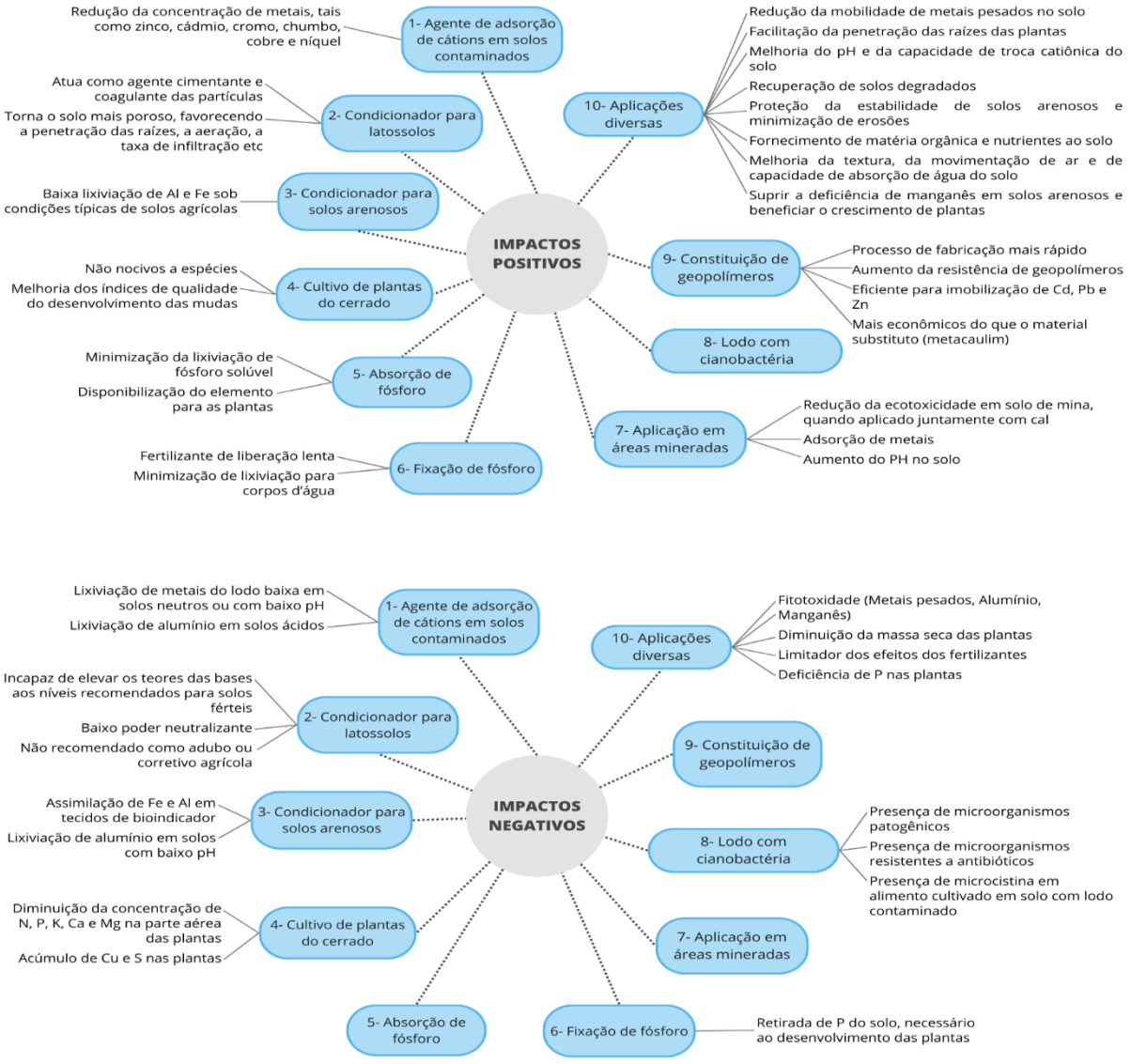
O questionário foi dividido em duas seções: uma relacionada ao uso benéfico de LETAs em obras de solo (impactos positivos e negativos) e outra da disposição final de LETAs em aterros para resíduos de classe 1 ou 2, subdividida em meio biofísico e antrópico. Para a ponderação, foi utilizada uma escala de 0 a 5, sendo que 0 foi atribuído ao não reconhecimento do impacto e 5 ao impacto de maior importância. A pesquisa foi realizada no primeiro semestre de 2022. Os resultados da *Survey* foram sistematizados e classificados em função da categoria do respondente, sendo os impactos avaliados entre 4 e 5 considerados como os reconhecidos pelos atores sociais. Esses potenciais impactos foram discutidos a partir do referencial bibliográfico e do arcabouço legal vigente no Brasil.

Para o tratamento dos dados obtidos através da pesquisa, foi realizada análise estatística e sistematização dos dados, com o uso do ChartExpo e da calculadora *Analytic Hierarchy Process* (AHP). O ChartExpo é uma ferramenta que utiliza a escala Linkert e que permite a visualização de como os entrevistados escolhem os níveis de concordância e discordância. A ferramenta possibilita a identificação de opiniões, atitudes e sentimentos de pessoas sobre um determinado produto ou serviço específico (Cohen, 2007). A calculadora AHP é um método de multicritério, que se baseia no método newtoniano e cartesiano de pensar e busca tratar a complexidade com a decomposição e divisão do problema em fatores. Esses fatores podem ainda ser decompostos em novos fatores até ao nível mais baixo, claros e dimensionáveis e estabelecer relações que podem ser sintetizadas. Este método é dividido em três etapas do pensamento analítico: construção de hierarquias; definição de prioridades e consistência lógica (Marins *et al.*, 2009).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos trabalhos selecionados, por meio da revisão sistemática, os usos de LETAs em solos foram categorizados em dez classes, a saber: agente de adsorção de cátions em solos contaminados, condicionador para latossolos, condicionador para solos arenosos, cultivo de plantas do cerrado, absorção de fósforo, fixação de fósforo, aplicação em áreas mineradas, lodo com cianobactéria, constituição de geopolímeros e aplicações diversas. Para cada um desses usos foram identificados os potenciais impactos ambientais da aplicação, classificados como positivos e negativos em função das informações disponibilizada pelos autores. A Figura 2 apresenta os impactos positivos e negativos encontrados na revisão, de acordo com os 10 usos encontrados para aplicação de lodo de ETA em solos.

Figura 2 - Potenciais impactos positivos e negativos identificados na aplicação de LETAs em solos



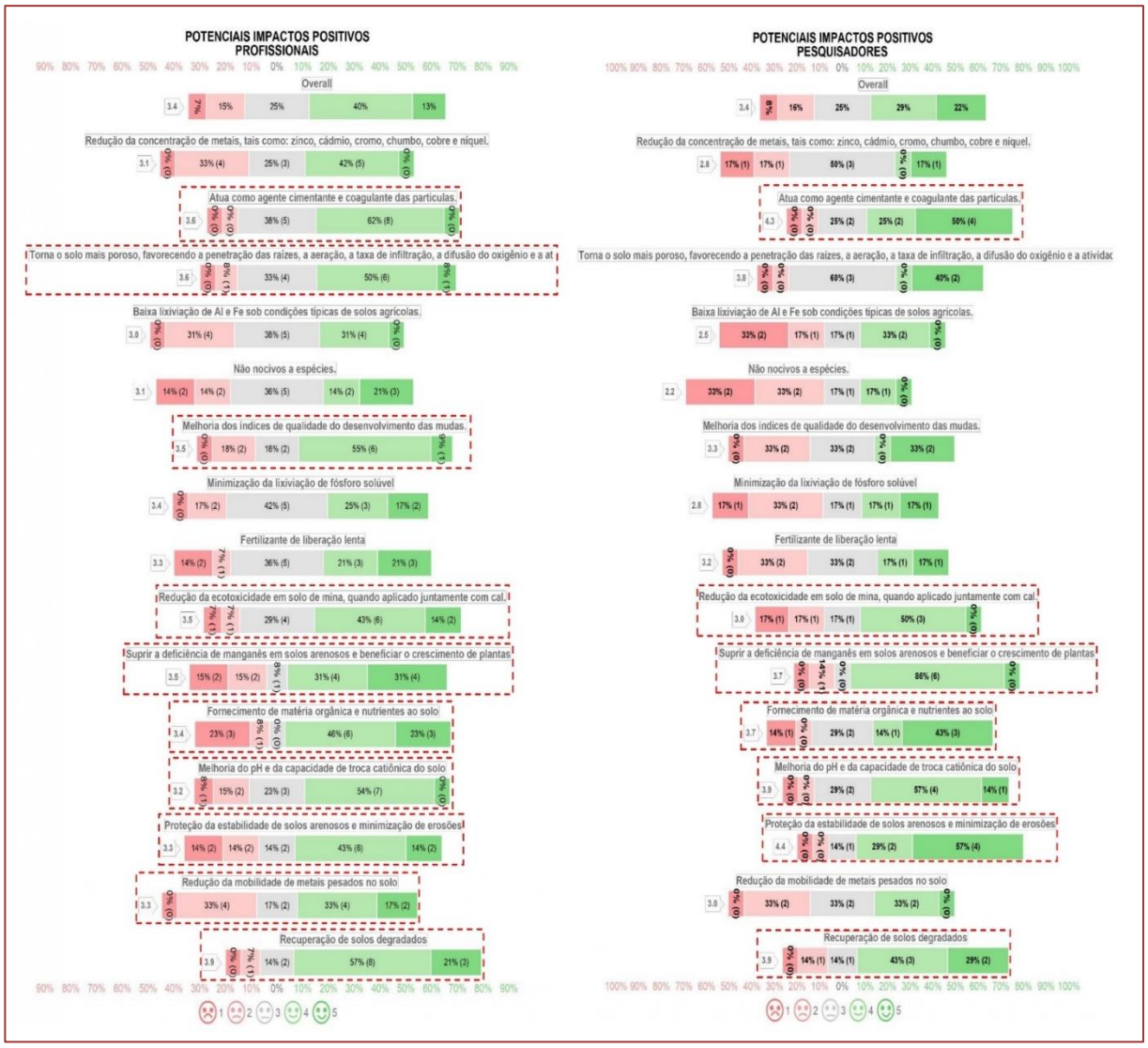
Fonte: Mahdy, Elkhatib e Fathi (2012); Oliveira, *et. al*. (2015); Howells, *et. al*. (2018); Figueiredo Neto (2011); Ramalho (2015); Ippolito (2015); Alvarenga, *et. al.* (2018); Ai, Lee and Lee (2020); Ji, Su and Pei (2020); Zhao, *et. al.* (2018).

Conforme mostrado na Figura 2, em alguns estudos os autores não reportaram impactos positivos e negativos. Exemplo disso pode ser observado para o uso 8 (aplicação do lodo com cianobactérias) cujos autores não identificaram os impactos positivos e para os usos 7 e 9 (aplicação em áreas mineradas e constituição de geopolímeros, respectivamente) onde os autores não reportam os potenciais impactos negativos. Cabe destacar que nenhum dos estudos relaciona todos os potenciais impactos da interação entre LETA e solo. Infere-se que isso esteja associado à complexidade da identificação dos impactos diretos e de suas interações nos meios biofísicos e socioeconômicos. Esse achado corrobora com o disposto por Urban, Lima e Morita (2019), que abordam a incipiência de estudos voltados ao entendimento dos potenciais impactos ambientais relacionados aos usos benéficos de LETAs.

Por meio da *Survey,* obteve-se 22 avaliações dos impactos ambientais da aplicação de LETAs em solos. Dessas, 64% advieram de profissionais da área de Saneamento, que foi equivalente a 14 respostas englobando técnicos de saneamento, engenheiros de campo (ambiental, civil, químico e etc) e profissionais de gerenciamento operacional. As avaliações realizadas por pesquisadores universitários da área de Saneamento Ambiental, Geotecnia e Engenharia de Transportes, representaram 32%, ou seja, 7 respostas. As demais avaliações corresponderam a 4% representando outros profissionais que trabalham com o manejo de LETAs.

Dentre os respondentes estão informantes-chave brasileiros do estado de São Paulo, Minas Gerais, Ceará e também de Portugal. Os resultados quantitativos, referentes às percepções dos atores sociais participantes desta pesquisa estão apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, de forma segregada para os profissionais do saneamento atuantes diretamente em ETAs e os pesquisadores da área. Além da quantificação dos resultados da pesquisa, aplicou-se o método AHP (Figuras 4, 6 e 8.), que é o método mais utilizado e conhecido no apoio à tomada de decisão na resolução de questões com múltiplos critérios. Dessa forma, foi possível calcular e definir as prioridades dos impactos listados de acordo com as percepções.

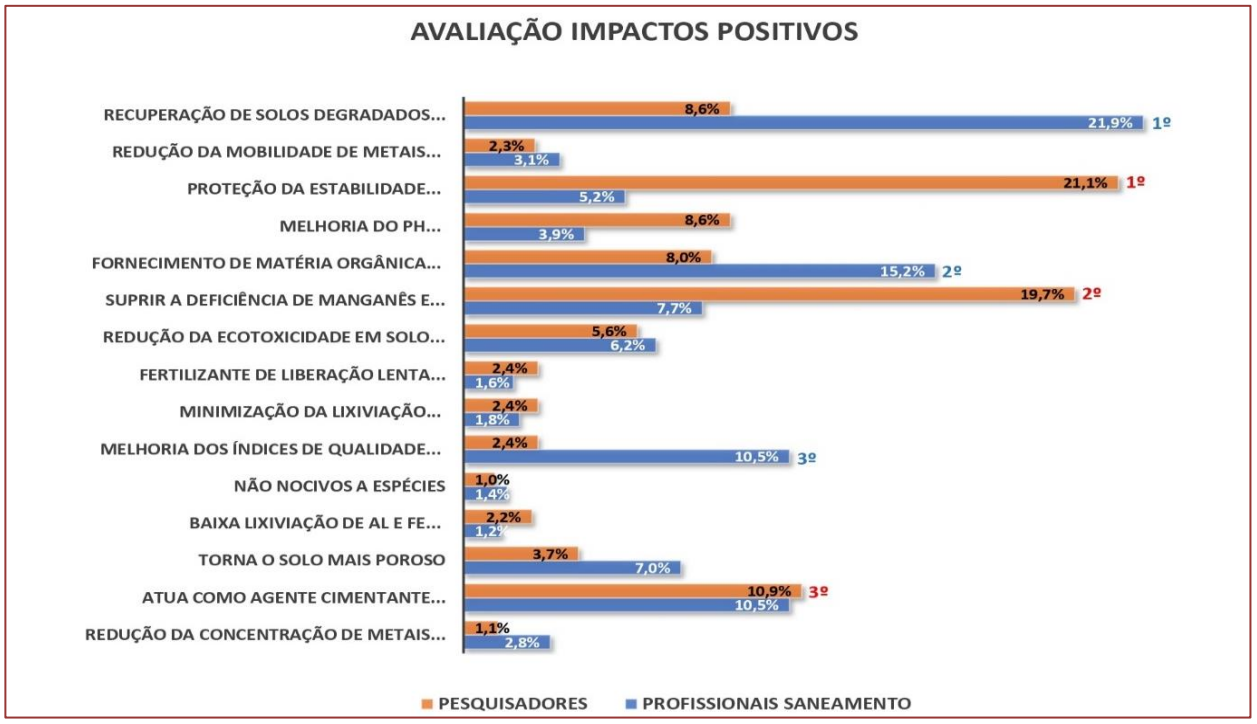
Figura 3 - Potenciais impactos positivos do uso benéfico da LETAs em solos



Conforme mostrado na Figura 3, os profissionais da área de saneamento avaliaram 10 impactos positivos como os mais relevantes, enquanto os pesquisadores consideraram somente 7. Esses foram impactos onde a maioria das avaliações estavam entre 4 e 5 (destacado na Figura 3 com tracejado em vermelho) de acordo com a escala apresentada no formulário, representando assim os mais importantes na percepção desses atores sociais.

A Figura 4 apresenta os gráficos gerados a partir do método AHP, onde realizou-se cálculos com base nas comparações da lista de potenciais impactos, a fim de identificar as prioridades nas avaliações de acordo com as percepções dos entrevistados. Foi possível identificar que os 3 impactos positivos mais relevantes na percepção dos profissionais da área do saneamento, em ordem decrescente, foram: recuperação de solos degradados; fornecimento de matéria orgânica e nutrientes ao solo e; melhoria dos índices de qualidade do desenvolvimento das mudas.

Figura 4 - Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções



Com base na avaliação dos profissionais da área, o impacto mais relevante (recuperação de solos degradados), de acordo com Cosme *et al.*, (2009), é justificado pois as características dos LETAs o tornam mais similar ao solo do que os lodos de esgotos. Neste caso, o nitrogênio e a matéria orgânica contida no LETA são, em geral, mais estáveis, menos reativos em menores concentrações. Além disso, alguns estudos indicam que doses controladas dos LETAs influenciam positivamente no crescimento das plantas e sua disposição pode ser realizada em áreas degradadas (Wu *et al*., 2019). Silva (2022), avaliou os efeitos da utilização de LETAs como componente do substrato utilizado na produção de mudas e como resultado, observou-se uma melhora no índice de qualidade das mudas, influenciado pelas doses de LETAs, onde a recomendação de adição é de até 20%.

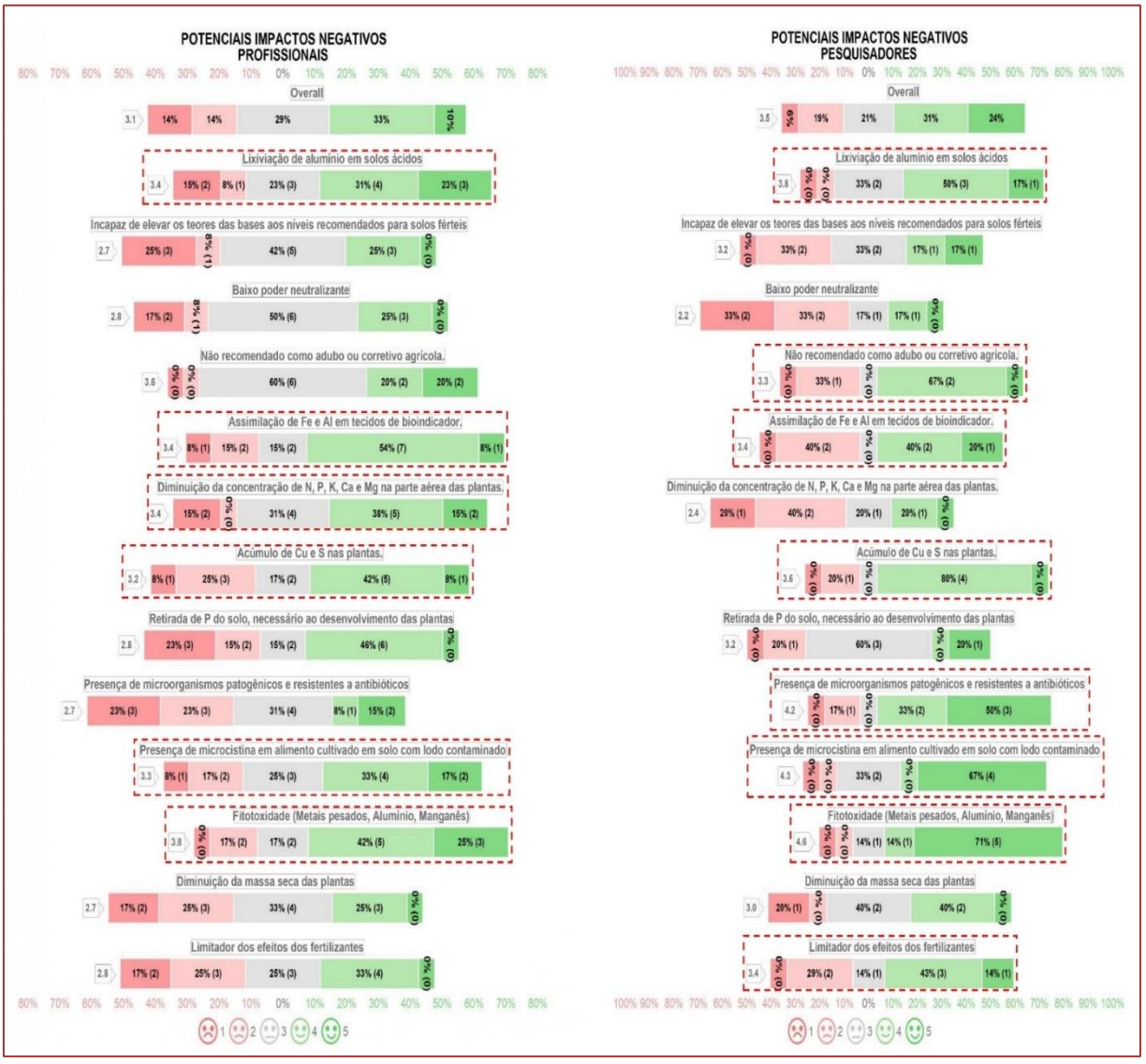
Lucon *et al*., (2019), em seu estudo sobre o uso agrícola de lodos de estação de tratamento de água, avaliou a capacidade de fornecimento de matéria orgânica, através da aplicação de LETAs em solo para o cultivo de milho. O autor verificou que as alterações para a matéria orgânica do solo devido a presença de LETA foram discretas, mas significativas, sendo que os tratamentos que receberam maior dose de lodo foram estatisticamente superiores aos tratamentos que não receberam o lodo. Todavia, de acordo com Franco (2019), uma vez que o lodo proveniente de ETAs não é tão rico em matéria orgânica, a sua mistura com outros resíduos, como o lodo de esgoto, proveniente de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), poderia potencializar o seu uso na agricultura, já que o lodo de ETE possui maior quantidade de matéria orgânica e quantidades significativas de macro e micronutrientes.

Para os pesquisadores entrevistados por essa pesquisa, os potenciais impactos positivos mais relevantes foram: proteção da estabilidade de solos arenosos e minimização de erosões; supreção da deficiência de manganês em solos arenosos e efeito benéfico para o crescimento de plantas e; atuação como agente cimentante e coagulante das partículas. De acordo com Montalvan, (2016), a resistência ao cisalhamento é uma das propriedades mais importantes dos solos, pois os parâmetros de resistência influenciam principalmente a estabilidade dos taludes (naturais e de aterros). Essas propriedades de resistência também são encontradas nos LETAs, possibilitando assim sua aplicação em obras geotécnicas. Essa informação corrobora para a avaliação dos pesquisadores, que indicaram como mais relevante o impacto positivo de proteção da estabilidade de solos arenosos e minimização de erosões.

Segundo Wasserman *et al*., 2019, os LETAs normalmente possuem em sua composição uma concentração significativa de manganês, normalmente proveniente do próprio manancial. Dessa forma, a utilização dos lodos de ETAs para suprir a deficiência de manganês em solos arenosos, possui um potencial significativo visto que, o manganês é um micronutriente essencial para fotossíntese e é importante para reduzir nitrato em nitrito nas plantas (Neves, 2019). A propriedade dos LETAs de atuação como agente cimentante foi avaliada por Oliveira *et al*. (2015), que verificou que a aplicação do lodo de ETA em solo proporcionou a redução de 20% do índice de saturação do solo por Al. Dessa forma, os autores afirmam que o LETA atua como agente cimentante e coagulante das partículas, tornando o solo mais poroso, o que favorece a penetração das raízes, a aeração, a taxa de infiltração, a difusão do oxigênio, a atividade biológica, melhorando assim a estrutura do solo e o desenvolvimento das plantas.

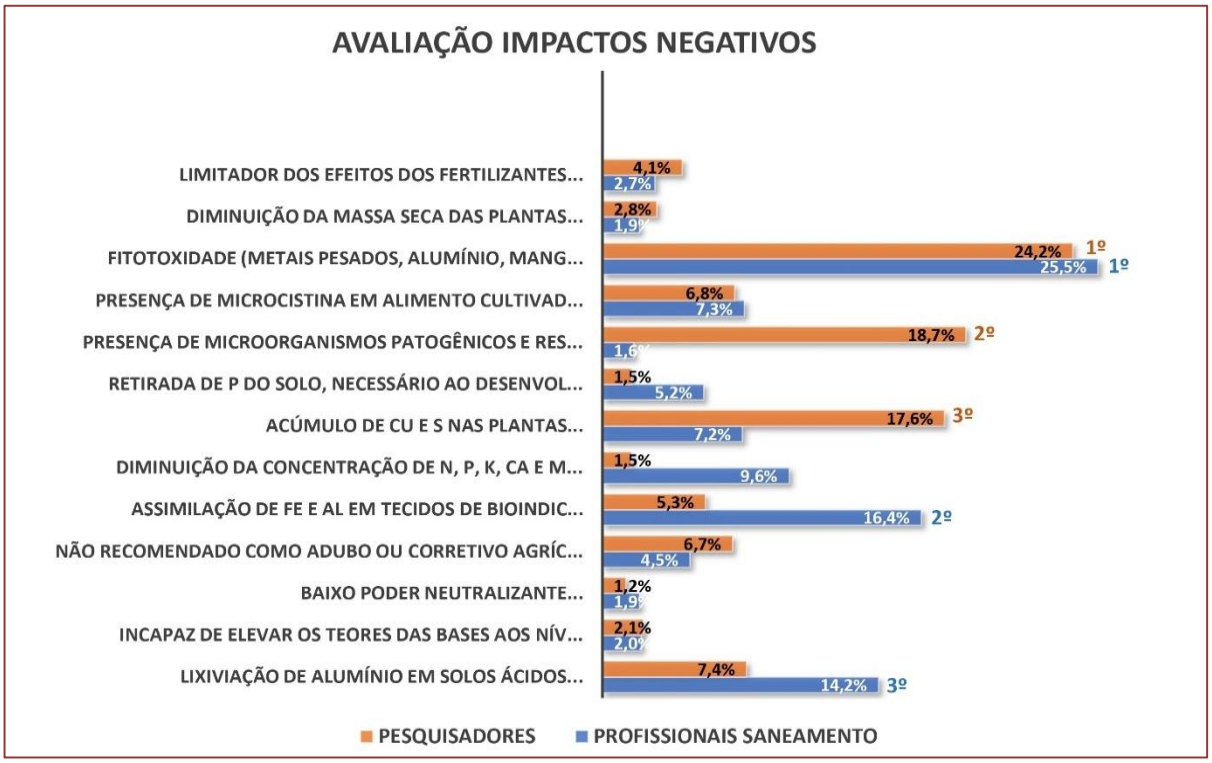
Na Figura 5 (avaliação dos potenciais impactos negativos), os profissionais da área de saneamento reconheceram 6 impactos negativos associados à deposição de LETAs em solos como os mais relevantes, enquanto os pesquisadores consideraram 8. Esses foram impactos onde a maioria das avaliações estavam entre 4 e 5, de acordo com a escala apresentada no formulário, representando assim os mais importantes na percepção desses atores sociais.

Figura 5 - Potenciais impactos negativos do uso benéfico da LETAs em solos



Já na Figura 6, está apresentado os gráficos gerados a partir do método AHP, onde realizou-se cálculos com base nas comparações da lista de potenciais impactos. Dessa forma, foi possível identificar que os 3 impactos negativos mais relevantes na percepção dos profissionais da área do saneamento em ordem decrescente foram: fitotoxidade (metais pesados, alumínio, manganês); assimilação de Fe e Al em tecidos de bioindicador e; lixiviação de alumínio em solos ácidos.

Figura 6 - Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções



A fitotoxicidade percebida como principal impacto negativo da deposição de LETAs no solo, por pesquisadores e profissionais da área do saneamento entrevistados nessa pesquisa, condiz com o que foi reportado por Rural e Maria (2001). Segundo os autores, o impacto ambiental negativo decorrente da toxicidade do alumínio é fator limitante da produtividade de culturas em solos ácidos.

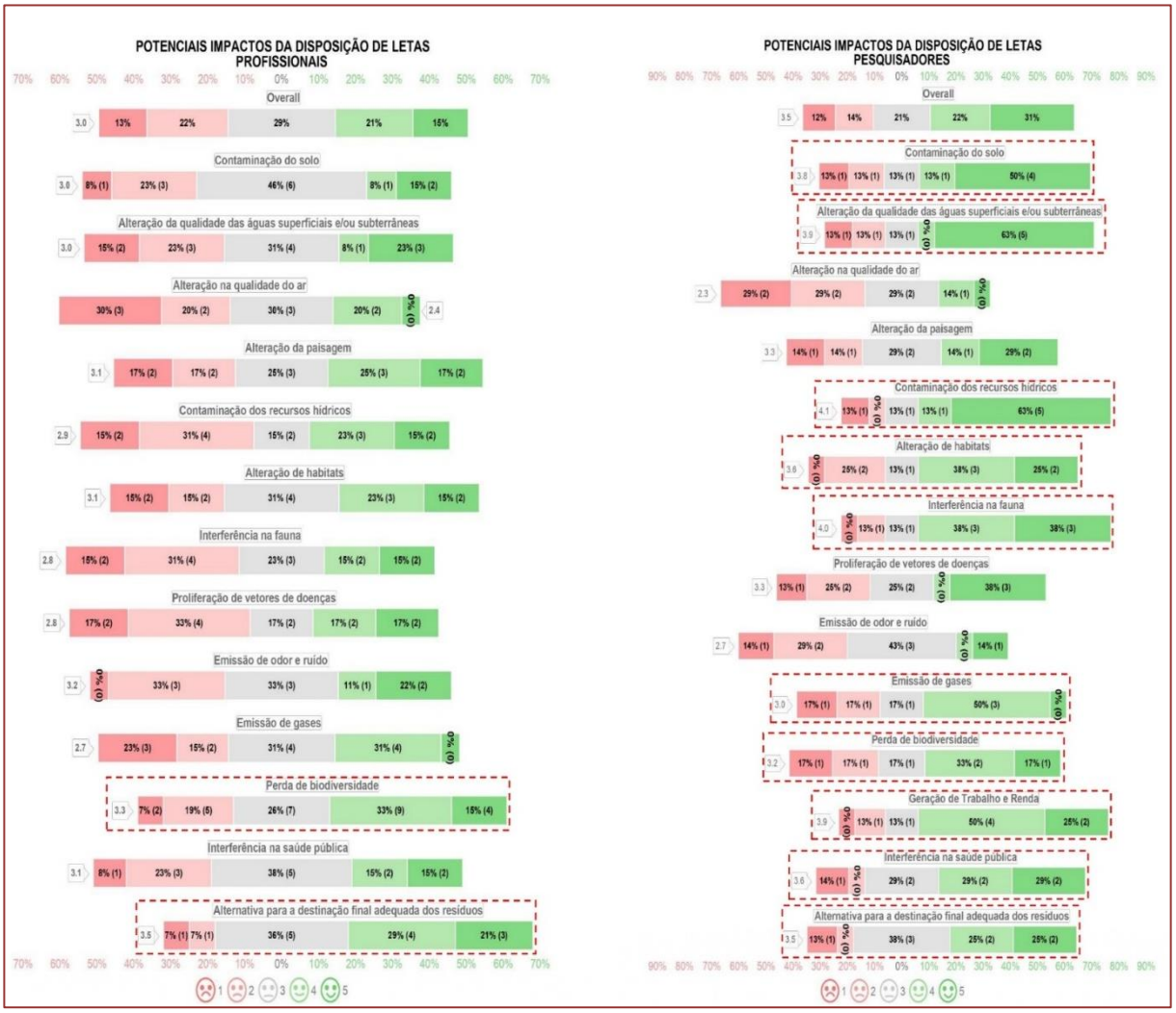
A priorização dos demais impactos negativos realizada pelos profissionais da área de saneamento, a saber: assimilação de Fe e Al em tecidos de bioindicadores e a lixiviação de alumínios em solos ácidos; reflete o conhecimento desses atores sociais a respeito da composição dos LETAs, que incorporam aos poluentes das águas brutas os dois principais coagulantes utilizados para a potabilização de águas brutas (Fe e Al). A presença majoritária desses elementos na composição dos LETAs foi reportada por Silva *et al*., 2012; Fiore *et al*., 2020; Lemos *et al*., 2020.

Os pesquisadores também reconheram como potenciais impactos negativos relevantes a presença de microorganismos patogênicos e resistentes a antibióticos e; o acúmulo de Cu e S nas plantas. A patogenicidade dos LETAs foi verificada por LEITE *et al*., (2023) em lodos desaguados de alumínio e ferro. Destaca-se que em estudo realizado por Silva *et. al* (2023), sobre a caracterização de LETAs desaguado e seco, foi observada a ausência de coliformes termotolerantes (fecais), *escherichia coli*, ovos viáveis de helmintos e *salmonella sp*. nesses lodos. Nessa pesquisa, os autores identificaram a presença de coliformes totais nas amostras de lodo desaguado e destacaram a ocorrência de redução significativa na concentração desse microorganismo após processo de tratamento térmico.

Em relação ao potencial acúmulo de Cu e S nas plantas, Silva (2005) relata que o uso do lodo de ETA como fertilizante pode ser viável porque contém determinados nutrientes às plantas como o próprio Fe e Ca, além de S, Mg, Cu, Mn. Porém, altas doses desses metais acumulados no solo podem vir a ser preocupantes, pois existe o risco de serem transferidos para as diferentes espécies de plantas e, portanto, de serem capazes de entrar na cadeia trófica (Rangel *et al*., 2006).

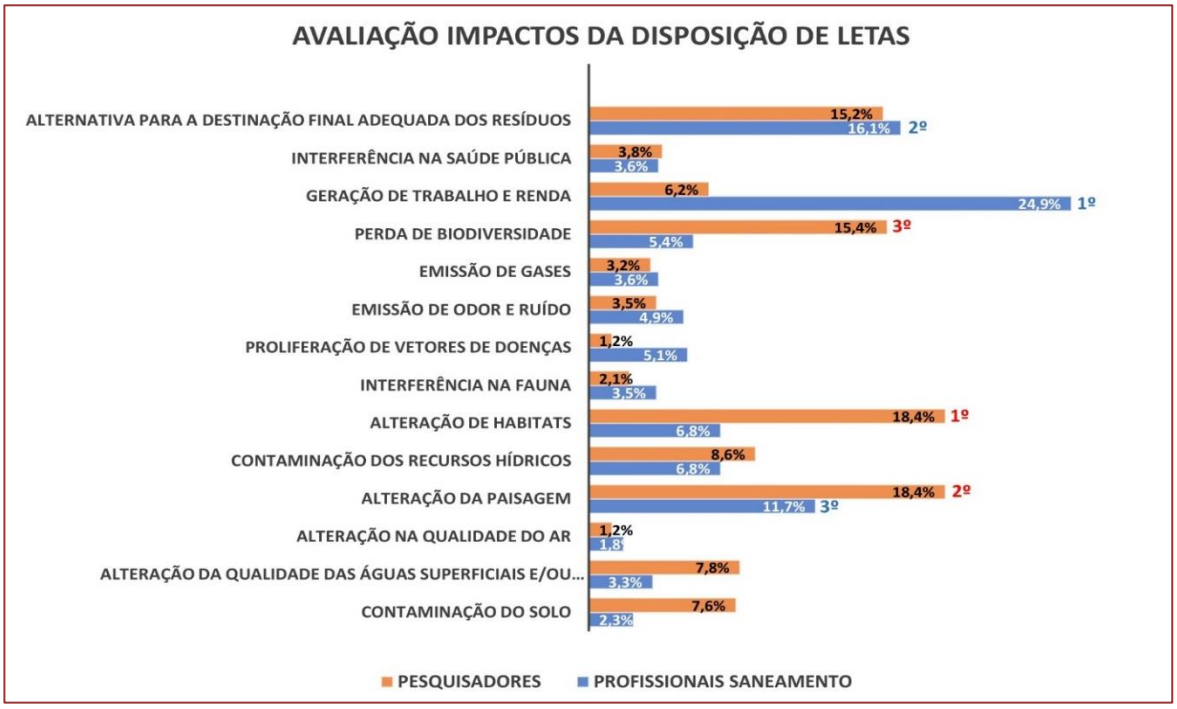
A Figura 07 apresenta a percepção dos profissionais da área de saneamento e dos pesquisadores em relação à disposição dos LETAs em aterros de classe 1 ou 2. Foram reconhecidos 2 potenciais impactos como os mais relevantes pelos profissionais da área de saneamento, enquanto os pesquisadores consideraram 10. Os impactos reconhecidos foram aqueles onde a maioria das avaliações estavam entre 4 e 5, de acordo com a escala apresentada no formulário, representando assim os mais importantes na percepção desses atores sociais.

Figura 7 - Potenciais impactos da disposição de LETAs como rejeitos em aterros sanitários



A Figura 8, apresenta os gráficos gerados a partir do método AHP, representando os cálculos com base nas comparações da lista de potenciais impactos, a fim de identificar as prioridades nas avaliações de acordo com as percepções dos entrevistados. Com isso, foi possível identificar que os 3 impactos positivos mais relevantes na percepção dos profissionais da área do saneamento em ordem decrescente foram: geração de trabalho e renda; alternativa para a destinação final adequada dos resíduos e; alteração da paisagem.

Figura 8 - Gráficos do método AHP para definição de prioridades de acordo com percepções



No Brasil, as melhores práticas de destinação final associada aos LETAs é a disposição em aterros sanitários (Fiore *et al*., 2022). Todavia, ainda que eles se configurem como uma alternativa de disposição final ambientalmente adequada, é impossível acreditar que eles sejam a solução única e definitiva (Gonçalves *et al*., 2017). A disposição dos LETAs em aterros já está sendo reduzida em muitas cidades modernas por causa da dificuldade em encontrar aterros sanitários, devido a necessidade de grandes áreas e dos custos de operação serem muito elevados, além do surgimento de legislações ambientais mais rigorosas que estão incentivando a busca de alternativas sustentáveis para a destinação final do lodo (Ahmad *et al*., 2016). Além dessas desvantagens, de acordo com (Fernandes *et al*., 2019), os aterros sanitários são responsáveis por problemas sociais e econômicos provocados aos moradores que vivem nas proximidades destes ambientes e são potenciais causadores de alterações na paisagem regional.

Para os pesquisadores entrevistados nessa pesquisa, os potenciais impactos da disposição dos LETAs mais relevantes foram: alteração de *habitats*; alteração da paisagem e; perda de biodiversidade. De acordo com Porciuncula (2014), a construção e operação de um aterro sanitário possui impactos inerentes relacionados à remoção da vegetação que

causa a degradação estética, a alteração do *habitat* devido a essa degradação, a perda da biodiversidade e a migração de animais para outras áreas.

A percepção dos profissionais da área do saneamento e dos pesquisadores quanto aos potenciais impactos ambientais da disposição de LETAs em aterros é diversa, com o primeiro grupo tendendo a priorizar impactos positivos e o segundo negativos. Também se verificou que os pesquisadores avaliaram maior quantidade de impactos dessa alternativa tecnológica, evidenciando maior rigor na avaliação e entendimento prévio do assunto abordado. A percepção mais aprofundada de pesquisadores também foi evidenciada por Simões *et al*., (2022) em seu trabalho sobre a percepção ambiental de diferentes atores sociais. Além disso, este resultado evidencia que ocorre pouca divulgação acerca dos potenciais impactos ambientais relacionados aos LETAs. Isto pode estar relacionado a quantidade e características dos trabalhos que vêm sendo publicados sobre a temática, que ainda se estabelecem com maior peso no âmbito de pesquisa do que em aplicações efetivas em ETAs de águas brasileiras.

4. CONCLUSÕES

Com base na pesquisa realizada, através da análise detalhada dos usos de lodo de estação de tratamento de água (LETA) em solos, apresentada neste texto, destaca-se a diversidade de aplicações desse resíduo e os potenciais impactos ambientais associados a cada classe de uso. A categorização em classes, como agente de adsorção, condicionador de solos e aplicação em áreas mineradas, evidencia a versatilidade dos LETAs, porém, também revela a complexidade na identificação dos impactos diretos e suas interações nos meios biofísico e socioeconômico.

A pesquisa, conduzida por meio de uma *Survey*, proporcionou a coleta de avaliações de profissionais da área de saneamento e pesquisadores, revelando diferentes perspectivas. A aplicação de uma análise estatística e sistematização dos dados, com o uso do ChartExpo e da calculadora do método AHP, contribuiu para a quantificação e priorização dos impactos ambientais, destacando aqueles percebidos como mais relevantes por cada grupo.

Também foi possível observar que os impactos ambientais referentes à disposição dos lodos de ETA ainda é um tema pouco conhecido, tanto no meio profissional quanto no âmbito da pesquisa. Alguns relatos de dificuldade ao responder o questionário reforçam este fato, pois muitos respondentes sinalizaram não conhecer alguns dos potenciais impactos ambientais descritos.

Apesar de algumas dificuldades pontuais, o formulário trouxe resultados muito enriquecedores para a pesquisa, já que abordou avaliações de públicos de diferentes áreas de conhecimento em saneamento, com percepções de acordo com suas vivências e contextos. Através disso, ampliou-se a percepção, tanto de pessoas que estão diretamente envolvidas no tratamento da água e na geração dos LETAs, quanto dos pesquisadores, que trazem uma abordagem científica e inovadora sobre o assunto. Além disso, o artigo une a percepção dos respondentes, com o conhecimento disponível na literatura já existente sobre a temática.

Também foi possível perceber a inexistência de legislações específicas para a disposição de LETAs no solo. Todavia, estudos apontam este tipo de disposição como um uso benéfico, que pode trazer diversos impactos positivos. Isso vai de encontro com a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que fomenta a apresentação de alternativas para

disposição ambientalmente adequada dos resíduos sólidos gerados em sistemas de tratamento de água.

Dessa forma, conclui-se que ainda existe uma lacuna no que se diz respeito ao conhecimento dos potenciais impactos da disposição dos LETAs, e que esse assunto requer novos estudos e ampla divulgação, para que ações preventivas sejam efetivamente tomadas nas Estações de Tratamento de Água.

AGRADECIMENTOS:

Esse projeto recebeu recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (Processo: 2020/12230-4). A co-autora Ana Carolina Brants Menezes recebeu bolsa de iniciação científica da FAPESP (Processo: 2021/03070-6).

REFERÊNCIAS

[1] ACKAH, La; Guru, R.; Peiravi, M.; Mohanty, M.; Ma, X.; Kumar, S.; Liu, J. Characterization of Southern Illinois Water Treatment Residues for Sustainable Applications. Sustainability, 2018. https://doi.org/10.3390/su10051374.

[2] AI, Y.; Lee, S.; Lee, J. Drinking water treatment residuals from cyanobacteria bloom-affected areas: Investigation of potential impact on agricultural land application. Science of The Total Environment, 706, 2020, 135756, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135756.

[3] ALVARENGA, P.; Ferreira, C.; Mourinha, C.; Palma, P.; de Varennes, A. Chemical and ecotoxicological effects of the use of drinking-water treatment residuals for the remediation of soils degraded by mining activities. Ecotoxicology and Environmental Safety. 161. 281 – 289, 2018 (https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.05.094).

[4] ARAB K., THOMPSON D.F., OLIVER I.W. Trialling Water-Treatment Residuals in the Remediation of Former Mine Site Soils: Investigating Improvements Achieved for Plants, Earthworms, and Soil Solution. Environmental Toxicology and Chemistry. 2020 May;39(6):1277-1291. DOI: 10.1002/etc.4706.

[5] BENLLALA, A. Characterization and valorization of drinking water sludges applied to agricultural spreading. *Journal of Materials and Environmental Science*, Volume 6, Issue 6, Pages 1692 - 16982015.

[6] BOSCOV, M.E.G.; Tsugawa, J.K.; Montalvan, E.L.T. Beneficial Use of Water Treatment Sludge in Geotechnical Applications as a Sustainable Alternative to Preserve Natural Soils. Sustainability 2021, 13, 9848. https://doi.org/10.3390/su13179848.

[7] BRASIL. Lei Federal no 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9. 605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

[8] BRASIL. (MMA) Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos - Consulta Pública. Brasília: [s. n.], 2020. Disponível em: <http://consultaspublicas.mma.gov.br/planares/wp-content/uploads/2020/07/Plano-Nacional-de-Res%C3%ADduos-S%C3%B3lidos-Consulta-P%C3%BAblica.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2021.

[9] CETESB. Roteiro para elaboração de estudo ambiental para implantação de aterro sanitário (capacidade superior a 10 t/dia), 2019. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/licenciamentoambiental/wpcontent/uploads/sites/32/2019/12/Manual_EIA_RAP_v_02.pdf.

[10] CHEN C. F.; Ju, Y. R.; Lim, Y. C.; Hsieh, S. L.; Tsai, M. L.; Sun, P. P.; Katiyar, R.; Chen, C. W.; Dong, C. D. Determination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Sludge from Water and Wastewater Treatment Plants by GC–MS. Int J Environ Res Public Health. 2019;16(14):2604. Published 2019 Jul 22. doi:10.3390/ijerph16142604. doi: 10.3390/ijerph16142604.

[11] DOHIM, M., Abdelaal, A., Beheary, M., Abdullah, N., A. Razek, T. Compressive Strength of Geopolymeric Cubes Produced from Solid Wastes of Alum Industry and Drinking Water Treatment Plants.

Egyptian Journal of Chemistry, 2019; 62(12): 2331-2340. doi: 10.21608/ejchem.2019.12745.1790.

[12] FIGUEIREDO NETO, A. Utilização de lodo de estação de tratamento de água na produção de mudas de árvores com ocorrência no cerrado. Dissertação de mestrado. PPGEMA. Universidade Federal de Goiás. http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/618.

[13] FIORE, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. Quality of surface water and generation of sludge at water treatment plants. Rev. Ambient. Água, vol. 15, n. 5, 2020. https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2565.

[14] FIORE, F. A.; Rodgher, S.; Ito, C. Y. K.; Bardini, V. S. S.; Klinsky, L. M. G. Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. Cleaner Engineering and Technology, Volume 9, 2022, 100512, ISSN 2666-7908, https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512.

[15] GROVES, R. M.; FOWLER JR., F. J.; COUPE, M. P.; LEPKOWSKI, J. M.; SINGER, E.; TOURANGEAU, R. Survey Methodology, 2nd Edition, 2009.

[16] HOWELLS, P.A; LEWIS, J.S; BEARD, B.D; OLIVER, W.I. Water treatment residuals as soil amendments: Examining element extractability, soil porewater concentrations and effects on earthworm. Ecotoxicol Environ Saf., 2018 Oct 30;162:334-340. doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.06.087.

[17] IPPOLITO, J.A. Aluminum-Based Water Treatment Residual Use in a Constructed Wetland for Capturing Urban Runoff Phosphorus: Column Study. Water Air Soil Pollut. 2015. 226: 334. Disponível em: < https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-015-2604-2#citeas >. Acesso em abril de 2019.

[18] IWMI. Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture: Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London: Earthscan and Colombo: International Water Management Institute, 2007.

[19] JI, Z.; Su, L.; Pei, Y. Synthesis and toxic metals (Cd, Pb, and Zn) immobilization properties of drinking water treatment residuals and metakaolin-based geopolymers. Materials Chemistry and Physics. 242. 2020. 122535. ISSN 0254-0584. https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.122535.

[20] KOOPMANS, G. F.; Hiemstra, T.; Vaseur, C.; Chardon, W. J.; Voegelin, A.; Groenenberg, J. E. Use of Iron Oxide Nanoparticles for Immobilizing Phosphorus In-Situ: Increase in Soil Reactive Surface Area and Effect on Soluble Phosphorus. Science of The Total Environment, 2020, 711, 135220. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.135220.

[21] LAKATOS, Eva M. *Fundamentos de Metodologia Científica*. Disponível em: Minha Biblioteca, (9th edição). Grupo GEN, 2021.

[22] LEMOS, K., QUINTINO DE AGUIAR FILHO, S., & CAVALLINI, G. S. (2020). Avaliação Comparativa Entre Os Coagulantes Sulfato De Alumínio Ferroso E Policloreto De Alumínio Para Tratamento De Água: Estudo De Viabilidade Econômica. *DESAFIOS - Revista Interdisciplinar Da Universidade Federal Do Tocantins*, *7*(1), 109–119. https://doi.org/10.20873/uftv7-7824.

[23] LIU, Xin et al. The stability of drinking water treatment residue with ozone treatment. Environmental Technology, v.39, 13, pp. 1697-1704, 2018, publisher Taylor & Francis. doi = 10.1080/09593330.2017.1337231.

[24] MAHDY, A. M, et al. "Use of Drinking Water Treatment Residuals In Reducing Bioavailability of Metals In Biosolid-amended Alkaline Soils." *Communications in soil science and plant analysis*, v. 43,.8 pp. 1216-1236. doi: 10.1080/00103624.2012.662819.

[25] OLIVEIRA, A. P. S; Silva, J. B. G. S; Pereira, R. O; Santos, A. S. P. Avaliação dos atributos de um latossolo adubado com lodo de estação de tratamento de água. Revista Internacional de Ciências. V .5, n.2, jul./dez. 2015, 19p.

[26] RAMALHO, R.P.R.S; Avaliação do uso de resíduo de estação de tratamento de água na produção de espécies vegetais com ocorrência no cerrado. UFJF. Juíz de Fora: 2016. Disponível em: < https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5419 >. Acesso em julho de 2019.

[27] RANKOVIC, Bojan et al. Utilization of gamma and e-beam irradiation in the treatment of waste sludge from a drinking water treatment plant. Radiation Physics and Chemistry, Volume 177, 2020, 109174, ISSN 0969-806X, https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.109174.

[28] Rural, C., & Maria, S. (2001). Fitotoxicidade do alumínio: Efeitos, mecanismo de tolerância e seu

controle genético. 3, 531–541.

[29] SANTOS, Lilian Maria *et al*. Net Promoter Score: Marketing de relacionamento: a utilização da ferramenta net promoter score (NPS) para mensurar a satisfação dos clientes. 2018. Disponível em: <https://singep.org.br>. Acesso em: 26 de agosto de 2018.

[30] SANTOS, S. S. A.; Campos, V. P. Utilização de Resíduo Sólido de Estação de Tratamento de Água (lodo), como Matéria Prima para Confecção de Elementos da Construção Civil. Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (2), 273-287. DOI: 10.21577/1984-6835.20180021.

[31] SETTI, A. A.; Lima, J. E. F.; Chaves, A. G. M.; Pereira, I. C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001.

[32] SIMÕES, G., Fiore, F. A., & Silva, L. C. (2022). Mapping of ecosystem services provided by the Paraíba do Sul River alluvial plains APA. *Ambiente e Sociedade*, *25*. https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210188r2vu2022L2AO.

[33] ULLMANN, I.F.; Tunsjø, H.S.; Andreassen, M.; Nielsen, K.M.; Lund, V.; Charnock, C. Detection of aminoglycoside resistant bacteria in sludge samples from Norwegian drinking water treatment plants (2019) Frontiers in Microbiology, 10 (MAR), art. no. 487. doi: 10.3389/fmicb.2019.00487.

[34] UNDP - SIWI Water Governance Facility (2021). A Decade of Support for Water Governance Reform. Final Report of the GoAL WaSH Programme. Stockholm International Water Institute, Stockholm.

[35] URBAN, R. C.; Isaac, R. L.; Morita, D. M. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. Revista DAE. Ed. 219, vol 67, 2019. DOI: https://doi.org/10.4322/dae.2019.050.

[36] XU, Hangzhou *et al*. High-throughput sequencing reveals microbial communities in drinking water treatment sludge from six geographically distributed plants, including potentially toxic cyanobacteria and pathogens. Science of The Total Environment, Volume 634, 2018, Pages 769-779, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.008.

[37] YIN, R. K. Pesquisa qualitativa do início ao fim. Porto Alegre, RS, [s.n.], 2016.

[38] ZHANG, Yunhui; QIN, Junde; YI, Yaolin. Biochar and hydrochar derived from freshwater sludge: Characterization and possible applications. Science of The Total Environment, Volume 763, 2021, 144550, ISSN 0048-9697, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144550.

[39] ZHAO, Y.; Liu, R.;y Awe, O.W.;Yang, Y; Shen, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals – An explicit and comprehensive review. Chemical Engineering Journal, 353, 2018, Pages 717-726, ISSN 1385-8947, https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.143.

Capítulo 8

Aplicação da modelagem e simulação do sistema de abastecimento de água potável em um bairro residencial

Dener Martins dos Santos
Jonatan Ilídio da Silva
Gedeão Alberto da Silva
Jeferson Carvalho dos Santos
Paulo Felipe Junior
Paulo Cuconato

Resumo: A modelagem e simulação permite que pesquisas sejam realizadas em todas as áreas da ciência. O uso dessa técnica foi utilizado para demonstrar o comportamento do sistema de abastecimento de água potável até um bairro residencial hipotético, contendo 320 moradias com média de quatro moradores em cada uma e situado a 68m de altura e 800m de distância em relação à estação de tratamento de água. A simulação computacional foi realizada com os programas *Mathway* e E*xcel*. O projeto consistiu na instrumentação do sistema fluido mecânico com bombas hidráulicas operando em paralelo, tendo como foco principal o controle da vazão através de simulação computacional. A variação dos seguintes parâmetros também foi analisada a partir da mudança da geometria do rotor: controle de válvula na linha de recalque, controle da variação de rotação e controle pela recirculação do fluido para a sucção. Os resultados demonstraram que nas condições simuladas, a utilização de duas bombas hidráulicas supriria de modo eficaz o fornecimento de água para o bairro. O acoplamento de uma terceira bomba hidráulica ao sistema consistiria em desperdício caso fosse acionada. Esta terceira bomba hidráulica deveria ficar em stand by caso houvesse falha mecânica de uma daquelas em operação. Caso houvesse necessidade de se aumentar a altura manométrica, dever-se-ia aumentar a rotação das bombas hidráulicas para poder atender a demanda de fornecimento.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Simulação computacional, Bomba hidráulica, Estação de tratamento de água, Fornecimento de água à população.

1. INTRODUÇÃO

A engenharia possui papel importante no crescimento tecnológico, social e econômico da sociedade. As mais diferentes ramificações da engenharia são utilizadas em conjunto para realizar estudos que reverberarão na vida do homem em sociedade. A modelagem e simulação computacional consistem em uma ferramenta moderna que proporciona estudo mais realístico sobre situação, com um menor custo e dá versatilidade de análise de outras variáveis que podem influenciar um dado sistema. Essa pesquisa demonstra como a modelagem e simulação computacional são ferramentas para um estudo hipotético sobre como deveria ocorrer o abastecimento de água em um bairro residencial de modo eficiente. Ressalta-se que toda a pesquisa foi realizada por meio de simulação computacional, ou seja, desde as características da linha de transmissão de água, topografia do terreno, quantidade de moradores no total e por residência.

O projeto se desenvolveu a partir de o arquétipo de necessidade de abastecimento de água desde a estação de tratamento de água até a chegada à caixa d'água do bairro e desta para as residências. Assim se utilizou os conceitos agregados de fluido mecânica da movimentação de fluido em tubulação e a energia associada a esse deslocamento (Sonntag; Borgnakke e Van Wyley, 2003; Brunetti, 2009). O sistema fluido mecânico para o bombeamento da água desde a ETA até o bairro simulado utilizou-se os conceitos de bombas hidráulicas na simulação (Santos, 2007 e Henn, 2012).

Cabe ressaltar que se utilizaram dados médios dos seguintes parâmetros para a simulação: quantidade de morador, consumo por família e residência e o bairro é fictício.

Os parâmetros simulados foram: vazão, altura manométrica, potência e geometria do rotor. Eles impactaram diretamente nos resultados de operação das bombas centrífugas por estarem intimamente relacionados à rotação da máquina motora: motor elétrico ou turbina, uma vez que a vazão está diretamente proporcional a rotação, a altura manométrica ao quadrado da rotação e a potência ao cubo da rotação das máquinas motoras (Campos e Teixeira, 2010).

A curva característica da bomba se ajusta com a variação na rotação ou ao se modificar a geometria do rotor. No entanto, a alteração da geometria deste não deve ser considerada como uma forma eficiente de controle para a variação da curva característica. Contudo, este procedimento exige tempo de parada da bomba e demanda significativa mão de obra, logo, se trata de um recurso críticos em qualquer processo industrial.

Diante do exposto é apresentado através da modelagem matemática e simulação computacional como se pode analisar todo o sistema de abastecimento de água de um bairro e a influência da modificação de alguns parâmetros operacionais neste fornecimento.

2. DESENVOLVIMENTO

A metodologia utilizada neste trabalho para evidenciar a funcionalidade de operação foi a de utilizar dados próximos das condições reais para um conjunto de bombas hidráulicas. As associações de bombas hidráulicas podem ocorrer de acordo com dois arranjos específicos: série e em paralelo. A associação de bombas hidráulicas utilizadas neste trabalho foi em paralelo. Essa configuração privilegia a elevada vazão de processo, como a variável do processo mais importante. Essa solução se mostrou mais viável economicamente em comparação à utilização de uma única bomba de alta capacidade, cujo custo seria significativamente maior. A combinação de várias bombas de menor capacidade permite atingir a vazão total requerida de forma mais eficiente e econômica.

Uma das principais vantagens da associação em paralelo é a redundância operacional. Caso uma das bombas apresente falha, o sistema continuará funcionando, ainda que com uma redução temporária na capacidade de bombeamento. Isso resulta em um aumento no tempo de abastecimento de água potável para o conjunto habitacional, mas sem a interrupção total do fornecimento. Além disso, em sistemas com bombas em paralelo, a manutenção é simplificada. Devido a essa característica é possível desativar uma única bomba para reparos ou inspeções, enquanto as demais continuam em operação e garantir a continuidade do abastecimento sem a necessidade de interrupção completa do sistema.

Outro aspecto técnico relevante é a distribuição da carga hidráulica entre as bombas, o que reduz as tensões em determinados trechos da tubulação e componentes do sistema. Isso contribui para a diminuição do desgaste e, conseqüentemente, para o aumento da vida útil do equipamento e das linhas. Portanto, a operação de bombas em paralelo representa uma solução robusta e eficaz para sistemas de altas vazões. Ela combina eficiência hidráulica, otimização econômica, continuidade operacional durante manutenções programadas e maior confiabilidade no fornecimento de água.

Neste contexto, os parâmetros utilizados se basearam nos tipos de bombas hidráulicas normalmente utilizadas em Estações de Tratamento de Água (ETA).

A prerrogativa utilizada foi a seguinte: a construção de um fictício conjunto habitacional no bairro de São Silvestre no município de Barra Mansa cujas coordenadas são 22°32’30”s e 44°10’54”w. Esse loteamento possuiria 320 lotes; o abastecimento de água potável viria da estação de tratamento do município que se situa a 800 metros de distância do fictício conjunto habitacional proposto. A elevação do loteamento em relação à estação de tratamento possui de 68 metros de altura. Quando se utiliza um conjunto de bombas hidráulicas funcionando em paralelo se deseja privilegiar o deslocamento do fluido por grandes distâncias lineares (Ribeiro, 2018) e pequenas alturas manométricas. A figura 1 mostra o percurso que a tubulação percorrerá desde a Estação de Tratamento de Água (ETA) até o local do fictício empreendimento imobiliário.

Figura 1: Vista aérea da localização da ETA e do empreendimento mobiliário

Fonte: *Google Maps*, 2023.

Na figura 1 observa-se uma linha tracejada em azul propositalmente sobreposta à imagem. Este tracejamento se refere ao percurso que a tubulação iria percorrer para desde a ETA até o fictício empreendimento imobiliário.

No caso para o fluido escoar de um ponto a outro, se utiliza bombas para impulsionar o escoamento de forma forçada e aumentar a vazão. Neste caso para controlar o escoamento e variar o ponto de operação da bomba, considerou-se ajustes na velocidade do motor, alterações na geometria do rotor ou uso de válvulas de controle. Cabe lembrar que turbulência ou regime turbulento é o movimento desordenado das partículas do fluido no interior da tubulação. Quanto maior for à velocidade de deslocamento do fluido na tubulação, maior será a turbulência, maior será a perda de carga (Lima, 2003). As válvulas globo permitem uma regulagem eficiente do fluido, com desgaste mínimo por erosão, tanto na sede como no obturador (Procel, Bombas, 2008). A desvantagem desse controle é tem um maior gasto de energia, pois o líquido é bombeado para uma pressão maior do que a necessária e em seguida ocorre queda de pressão e de energia na válvula. Outro ponto é que devemos tomar cuidado ao instalar derivações como válvulas, curvas, joelhos, etc. nas linhas devido ao aumento das turbulências (Procel, Bombas, 2008). A variação de

rotação do acionador da bomba, que pode ser um motor elétrico ou uma turbina, muda a altura manométrica (head) dela, com isso a curva da bomba. Essa variação da velocidade (RPM) do acionador pode ser obtida com inversores de frequência (Campos e Teixeira, 2010).

Inversor de frequência é um dispositivo eletrônico utilizado para controlara a velocidade e o torque de motores elétricos de corrente alternada AC. Ele converte a energia elétrica de entrada, que é geralmente fornecida em uma frequência fixa, como 50 ou 60 Hz, em uma saída de frequência variável, isso permite que o motor funcione em diferentes velocidades sem a necessidade de meios mecânicos, como polias e redutores (Procel, Instrumentação, 2008). O inversor converte o sinal de corrente alternada CA da rede elétrica em corrente contínua CC, e em seguida novamente em CA. O sinal CA resultante é pulsado e modulado em largura, permitindo assim o ajuste de frequência e tensão para controlar velocidade e o torque do motor. Como já foi dito anteriormente o Head (H), a vazão (Q) e a potência (P) de uma bomba centrífuga variam conforme a rotação (N) (Campos e Teixeira, 2008).

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem matemática foi realizada utilizando-se dos conceitos contidos nas obras dos autores Brunetti (2009); Fox, McDonald e Pritchard (2010); Henn (2012); Lima (2003); Santos (2007); Verde (2018) e Mathias (2014).

As equações 01, 02 e 03 definem que a vazão (Q) é proporcional a rotação (N) (equação 01), o head (H) é proporcional ao quadrado da rotação (N) (equação 02) e a potência (P) é proporcional ao cubo da rotação (N) (equação 03). Os índices 1 e 2 descritos nas equações 01, 02 e 03; representam respectivamente: 1 = entrada; 2 = saída. A equação 04 descreve a potência total de bombeamento.

$$\frac{Q1}{Q2} = \frac{N1}{N2} \qquad (1)$$

$$\frac{H1}{H2} = \frac{N1^2}{N2^2} \qquad (2)$$

$$\frac{P1}{P2} = \frac{N1^3}{N2^3} \qquad (3)$$

$$P = \frac{H \times Q \times \rho}{\eta} \qquad (4)$$

Na equação 04, tem-se:

P = Potência total de bombeamento (w);

H = altura manométrica (m);

Q = Vazão (m^3/s);

ρ = Densidade da água (kg/m^3);

η = rendimento.

Outras considerações se fizeram necessárias para realização dos cálculos:

- Considerou-se que, em média, uma família brasileira é composta por 3,1 pessoas e consome cerca de 185 l/d de água potável.

- Com base nessas informações, estimou-se nos cálculos o quantitativo médio de 4 pessoas por família, então ter-se-ia 185 l/d x 4 = 740 l/d, sendo o total de 320 casas então seria 320 x 740 l/d = 236800 l/d, porém a instalação das bombas em paralelo deveria ser capaz de suprir essa demanda em aproximadamente 4h de operação.
- Convertendo 236800 l/d = 60 m^3/h = Q_P (vazão total do sistema); considerando 4h de operação diária das bombas.
- A altura de sucção das bombas que serão instaladas está a 3m de altura em relação ao plano horizontal de referência.
- Optou-se por utilizar 3 bombas em paralelo.

A seguir é demonstrada toda a modelagem matemática para quantificar o princípio de funcionamento do sistema de bombeamento de bombas hidráulicas funcionando em paralelo.

- Cálculo das energias: potencial (equação 05) e cinética (equação 06).

$$E_p = m.g.h \qquad (05)$$

$$E_c = \frac{1}{2} m.v^2 \qquad (06)$$

Onde: Ep = Energia Potencial (J);

E_C = Energia Cinética (J);

m = massa (kg);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

h = altura (m);

v = velocidade (m/s).

- Cálculo do Trabalho (equação 07) e Pressão(equação 08).

$$W = F . S \qquad (07)$$

$$P = \frac{F}{A} \qquad (08)$$

Onde:

W = Trabalho (J);

F = Força (kg.f);

S = Deslocamento (m);

P = Pressão (kgf/m^2);

A = área (m^2).

Ao considerar o regime estacionário, consideração que o volume de fluido na entrada (índice 1) da tubulação é igual ao da saída (índice 2), (Brunetti, 2009). Assim a equação de Bernouille (equação 09) é descrita da seguinte forma:

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} \qquad (09)$$

Onde:

h_1 = altura de sucção (m);

h_2 = altura de recalque (m);

ρ = densidade (kg/m³).

- Cálculo da Vazão (equação 10).

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{A.S}{t} = A.v \qquad (10)$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

V = volume (m³);

t = tempo (s).

Ao se considerar um conjunto de bombas hidráulicas funcionando em paralelo, o cálculo da vazão total destas operando em paralelo (Q_p) será como demonstrado nas equações 11 e 12.

$$\sum_i^n Q_i(H) \qquad (11)$$

$$Q_P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n \qquad (12)$$

Ao utilizar a equação (12) obteve-se a vazão desejada que cada bomba hidráulica possuísse partindo do princípio de que todas teriam as mesmas características construtivas.

$$Q_P = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \ldots + Q_n \qquad (12)$$

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$60 = 3Q \Longrightarrow Q = 20\ m^3/h$$

O balanço de energia do sistema fluidodinâmico este é descrito do seguinte modo, conforme a equação 13.

$$H_1 + H_b = H_2 + H_{perdas} \qquad (13)$$

Onde:

H_1 soma da energia potencial, cinética e pressão na entrada;

H_2 = soma da energia potencial, cinética e pressão na saída;

H_b = energia da bomba hidráulica;

H_{perdas} = energia das perdas de carga.

Adicionando a equação de Bernouille (equação 09) no balanço de energia (equação 13) chega-se a equação 14 (Teixeira, 2023):

$$H_b = h_2 - h_1 + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + H_{perdas} \quad (14)$$

$$H_{geo} = h_2 - h_1 \quad (15)$$

Onde:

H_{geo} = altura geométrica (m);

$\gamma = \rho \times g$ = peso específico do fluido (kg/m^3).

A equação 14 transforma-se na equação 16 ao se realizar as devidas substituições:

$$H_b = H_{geo} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + H_{perdas} \quad (16)$$

- Cálculo das perdas de cargas:

Para se obter a perda de carga total do sistema fluidodinâmico, tem que se calcular a perda de carga localizada (equação 17), Reynolds (equação 18) e a perda de carga contínua (equação 19).

$$H_L = k.\frac{v^2}{2g} \quad (17)$$

$$Re = \frac{v.D}{\delta} = \frac{k}{D} \quad (18)$$

$$Hc = f\frac{L.v^2}{D.2g} \quad (19)$$

Onde:

H_L = Perda de carga localizada (m);

k = Fator de atrito;

Re = Número de Reynolds (adimensional);

D = Diâmetro interno da tubulação (m);

δ = Viscosidade cinemática do fluido (m^2/s);

H_C = Perda de carga contínua (m);

f = Fator de atrito de Darcy Weibach;

L = Comprimento da tubulação (m).

- Cálculo do Rendimento:

As equações 20, 21 e 22; respectivamente, apresentam os procedimentos para o cálculo do rendimento das bombas centrífugas trabalhando em paralelo.

$$n_b = \frac{N}{N_b} \quad (20)$$

$$N = \rho.Q.H_b \quad (21)$$

$$N_b = \frac{\rho.Q.H_b}{n_b} = \frac{\rho\left(Q/3600\right).H_b}{75.n_b} \quad (22)$$

Onde:

n_b = Rendimento da bomba centrífuga (%);

N = Potência hidráulica (kg.m/h);

N_b = Potência mecânica (W);

75 = Fator de conversão de kg.m/h para cv.

O rendimento total de duas bombas (A e B) operando em um sistema fluidodinâmico em paralelo é descrita na figura 23:

$$n\ A//B = \frac{(Q\ A//B)}{\frac{Q_A}{n_A}+\frac{Q_B}{n_B}} \qquad (23)$$

Onde:

n A//B = Rendimento total do conjunto das bombas centrífugas associadas em paralelo, (%);

Q A//B = Vazão total do conjunto das bombas centrífugas associadas em paralelo, (m^3/s);

n_A = Rendimento da bomba A (%);

n_B = Rendimento da bomba B (%);

De acordo para a vazão de 60m^3/h (0,01666 m^3/s) e ao utilizar o método de Forcheimer, obteve-se o diâmetro da tubulação de recalque, conforme a equação 24:

$$\emptyset = D = 1{,}3 \times \sqrt{Q} \times \sqrt[4]{x} \qquad (24)$$

Onde:

D = Diâmetro da tubulação (m). D_{REC} para recalque e D_{SUC} para sucção;

x = Capacidade horária da bomba/24 horas = 4 / 24 = 0,1666;

D_{suc} = 0,1065m = 106,5mm ≈ 110mm.

Adotou-se D_{suc} = 125 mm

Agora para vazão de 20m^3/h (0,00555 m^3/s), conforme a equação 24:

D_{rec} = 0,0619m = 61,9mm ≈ 62mm

Comercialmente, os diâmetros das tubulações são padronizados, assim:

D_{rec} = ϕ = 80mm

D_{suc} = ϕ = 125mm

A partir da vazão e do diâmetro da tubulação, calculou-se a velocidade de escoamento do fluido na tubulação.

$$v = \frac{Q}{A} \qquad (25)$$

Onde: v = Velocidade de escoamento do fluido na tubulação (m/s);

A = Área da seção transversal da tubulação (m^2).

A partir de conhecida às vazões e considerando os diâmetros das tubulações, obteve-se a velocidade de escoamento do fluido, a partir da equação 20, como demonstrado no quadro 1.

Quadro 1: Velocidades de Escoamento em função do diâmetro da tubulação

Diâmetro da Tubulação (m)	Velocidade de escoamento (m/s)
ϕ = 80mm = 0,08m	v = 1,1 m/s
ϕ = 125mm = 0,125m	v = 0,5 m/s
ϕ = 150mm = 0,150m	v = 0,93 m/s

O quadro 2 apresenta em detalhes do ramal da linha de abastecimento que deveriam ser utilizadas na tubulação desde a ETA até o conjunto habitacional, conforme apresentada na figura 1. Caber ressaltar que também se considerou que a tubulação e as respectivas conexões e válvulas seriam de ferro fundido.

Quadro 2: Detalhes construtivos do ramal da linha de abastecimento

Acessórios de sucção Ø 125 mm	k	Acessórios de recalque Ø 80 mm	k	Acessórios de recalque Ø 150 mm	k
3 válvulas crivo	0,75	3 válvulas de retenção	2,5	3 curvas de 45°	0,2
3 curvas de 90 °	0,4	3 válvulas borboleta	0,3	8 curvas de 90°	0,4
		1 curva de 90°	0,4	1 saída	1
		2 Tês	0,6		
12 metros de tubo		3 metros de tubo		818 metros de tubo	
Material ferro fundido.					

k = fator de atrito

O quadro 3 apresenta o resultado do cálculo da perda de carga localizada (equação 17), Reynolds (equação 18) perda de carga contínua (equação 19) para cada um dos diâmetros da tubulação utilizados na modelagem matemática.

Quadro 3: Perdas de Carga (localizada e contínua) e Reynolds

	Ø 80 mm		Ø 125 mm		Ø 150 mm	
Perda carga localizada (HL)	0,62m		0,04m		0,21m	
Número de Reynolds	8800	(k/D) = 0,00325	70.000	(k/D) = 0,002	93.000	(k/D) = 0,0017
		f = 0,0275		f = 0,0275		f = 0,0275
Perda de carga contínua (HC)	0,2m		0,033m		5,53m	

f = Fator de atrito de Darcy Weibach.

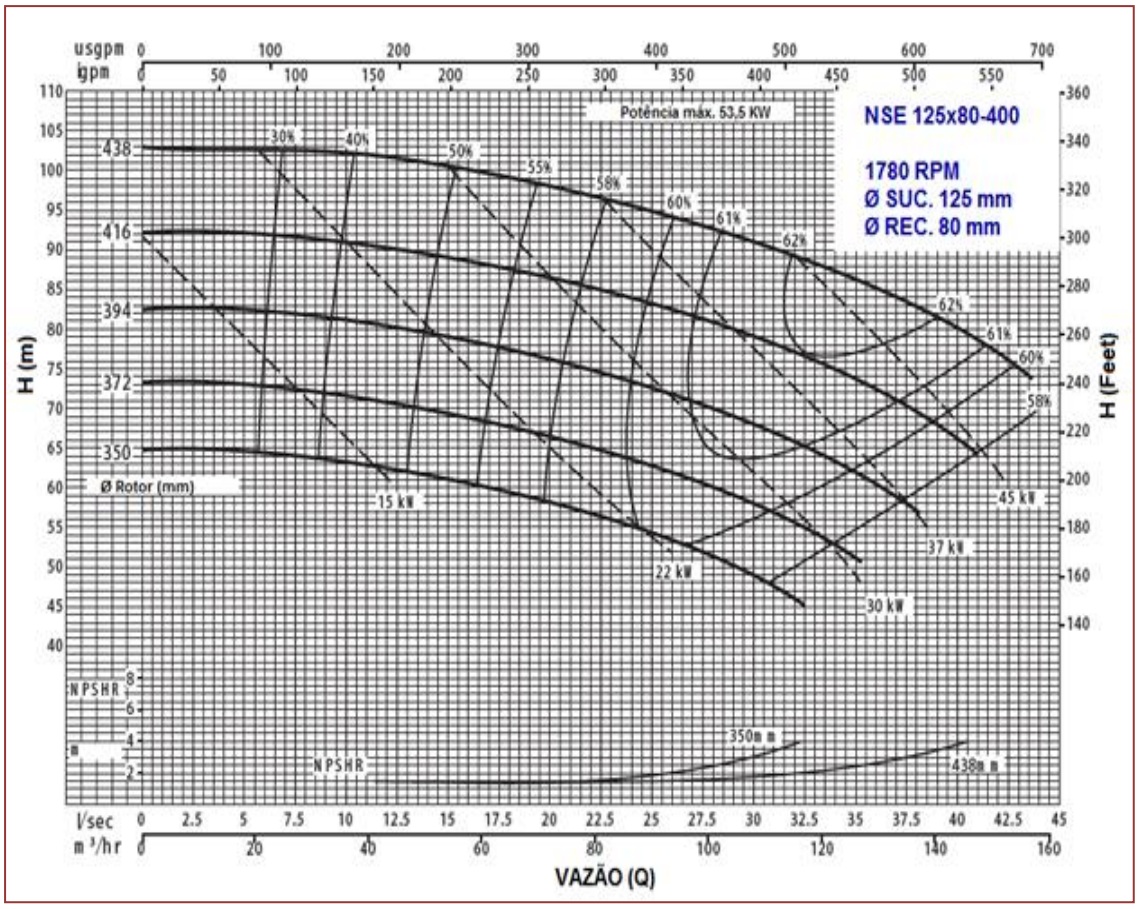
A partir dos dados descritos no quadro 3, obteve-se o valor da energia de perda de carga, H_{perdas}, (equação 13) e energia da bomba hidráulica, H_b (equação 14).

H_{perdas} = 0,04 + 0,033 + 0,62 + 0,2 + 0,21 + 5,53 = 6,6 m

$H_b = 68 + 3 + 6,6 = 77,6$ mca

Após obter a vazão de cada bomba de 20 m^3/h, utilizaram-se ábacos fornecidos pelos fabricantes de bombas hidráulicas para encontrar a que melhor se adequaria ao sistema fluidodinâmico proposto, conforme mostrada na figura (2) a seguir. Neste caso, se utilizou informações de operação da bomba hidráulica (variação do diâmetro do rotor e da rotação até o limite máximo de 1780 RPM fornecido pelo fabricante).

Figura 2: Ábaco para definição dos detalhes construtivos das bombas hidráulicas de acordo com as características de utilização



Fonte: ESCO Fabricante de Bombas hidráulicas (2023).

A partir dos dados aferidos na figura 2, o modelo que mais se adequou as características propostas foi a seguinte: modelo NSE 125-80-400 ESCO. Outros detalhes aferidos foram:

- $\eta = 30\%$;
- Ø 125 mm (tubulação do fluxo em paralelo de recalque conforme especificação do modelo de bomba hidráulica fornecida pelo fabricante);
- Convertendo $Q_P = 60m^3/h = 0,016666m^3/s$
- Convertendo $Q_1 = Q_2 = Q_3 = 20m^3/h = 0,00555\ m^3/s$

O critério adotado para a escolha da potência das bombas para operar em paralelo foi à necessidade de atender tanto à vazão quanto à altura manométrica do sistema. Cabe ressaltar que a quantificação da potência necessária para suprir as necessidades delineadas de abastecimento de água foi obtida por meio dos cálculos da modelagem matemática conforme demonstrados nas equações de 22 e 23. A partir desses dados, e após a realização das correções necessárias, convenções de unidades e adaptações para valores comerciais. Nesta avaliação se considerou tanto os detalhes construtivos quanto os parâmetros técnicos, a fim de determinar a melhor opção disponível no mercado.

N_b = 19,12 CV

Ao realizar a correção de 15%: N_b = 22 CV

Ao converter as unidades: N_b = 16,2 kW

Contudo comercialmente: N_b = 20kW

η A//B//C = 30%

Os resultados obtidos pelas equações 22 e 23 estão de acordo com os valores de referência de mostrados no Ábaco da figura 2.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A simulação computacional foi desenvolvida utilizando os softwares Mathway e Excel. A partir das equações descritas no item 3 variaram-se parâmetros utilizados nas simulações. Estes resultaram em diferentes vazões descritas, respectivamente, nas perdas de carga localizada (quadro 4), perdas de carga contínua (quadro 5) e perdas de carga do sistema (quadro 6).

Quadro 4: Resultados da simulação para perdas de carga contínua para diferentes vazões

Vazão Q		Sucção Ø 125 mm		Recalque Ø 80 mm		Recalque Ø 150 mm		Perda total
m^3/h	m^3/s	m/s	Perda (m)	m/s	Perda (m)	m/s	Perda (m)	
10	0,0028	0,228	0,007	0,557	0,0172	0,16	0,20	0,224
20	0,0055	0,448	0,0255	1,09	0,0635	0,311	0,73	0,819
30	0,0083	0,676	0,056	1,65	0,14	0,47	1,60	1,796
40	0,011	0,896	0,098	2,188	0,24	0,62	2,72	3,058
50	0,14	1,141	0,16	2,785	0,385	0,79	4,30	4,845
60	0,17	1,385	0,22	3,38	0,568	0,96	6,40	7,188

Quadro 5: Resultados da simulação para perdas de carga localizada para diferentes vazões

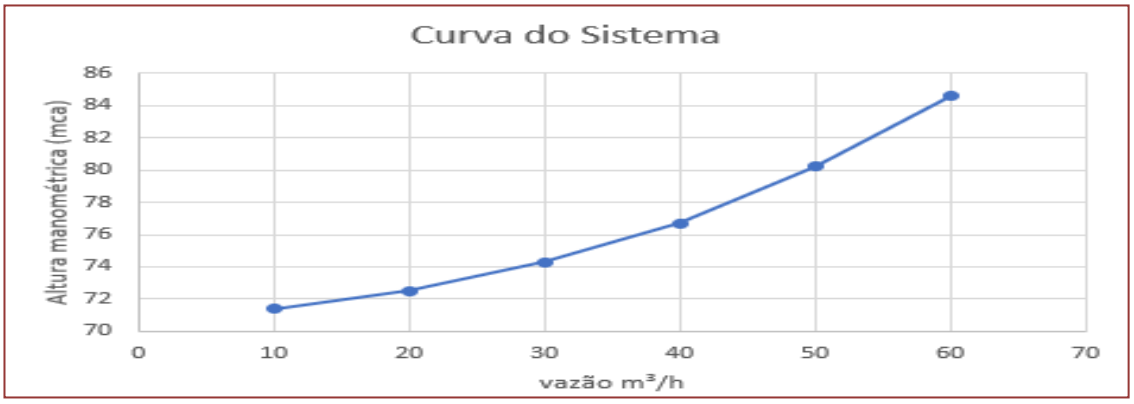
Vazão Q		Sucção Ø 125 mm		Recalque Ø 80 mm		Recalque Ø 150 mm		Perda total
m^3/h	m^3/s	m/s	Perda (m)	m/s	Perda (m)	m/s	Perda (m)	
10	0,0028	0,228	0,009	0,557	0,158	0,16	0,006	0,173
20	0,0055	0,448	0,035	1,09	0,605	0,311	0,024	0,664
30	0,0083	0,676	0,08	1,65	1,39	0,47	0,054	1,524
40	0,011	0,896	0,141	2,188	2,44	0,62	0,094	2,675
50	0,14	1,141	0,23	2,785	3,95	0,79	0,150	4,33
60	0,17	1,385	0,337	3,38	5,82	0,96	0,220	6,377

Quadro 6: Resultados da simulação para perdas de carga do sistema para diferentes vazões

Vazão (m^3/h)	Continua (m)	Localizada (m)	Perda de carga total (m)	Hgeo (m)	Hb (m)
10	0,224	0,173	0,397	71	71,4
20	0,819	0,664	1,483	71	72,5
30	1,796	1,524	3,32	71	74,3
40	3,058	2,675	5,733	71	76,7
50	4,845	4,33	9,175	71	80,2
60	7,188	6,377	13,565	71	84,6

A partir dos resultados obtidos podem-se demonstrar graficamente todas as curvas levantadas para o sistema fluidodinâmico simulado. A figura 3 apresenta o resultado gráfico da curva do sistema. A partir do demonstrado na figura 3 observou-se que o aumento da vazão no sistema como um todo para o bombeamento com bombas hidráulicas com funcionamento em paralelo com tendência parabólica, demonstrando como esse aumento influenciou na altura manométrica, principalmente para elevadas vazões.

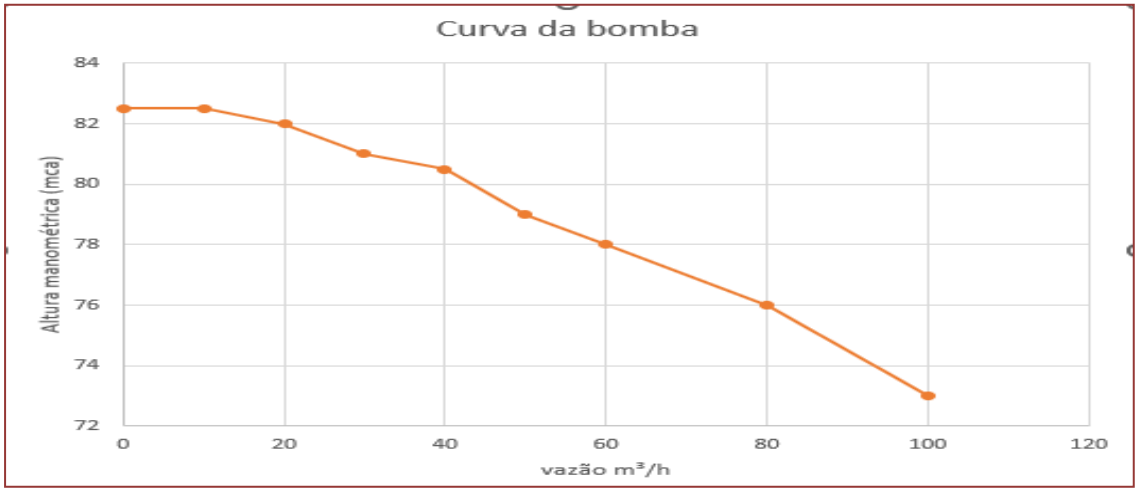
Figura 3: Relação entre o aumento da vazão no sistema e a altura manométrica alcançada



Fonte: Autores, 2024.

A figura 4 mostra o comportamento das bombas hidráulicas funcionando em paralelo durante o ciclo de operação. Observa-se nesta figura que a curva da bomba possui formato oposto ao do sistema, conforme demonstrado na figura 4. Ao se analisar, particularmente uma bomba ela possui a máxima elevação com a mínima vazão, que é quantificada pelo fabricante. Conforme os ciclos de operação há o declínio da altura manométrica alcançada conforme no aumento da vazão.

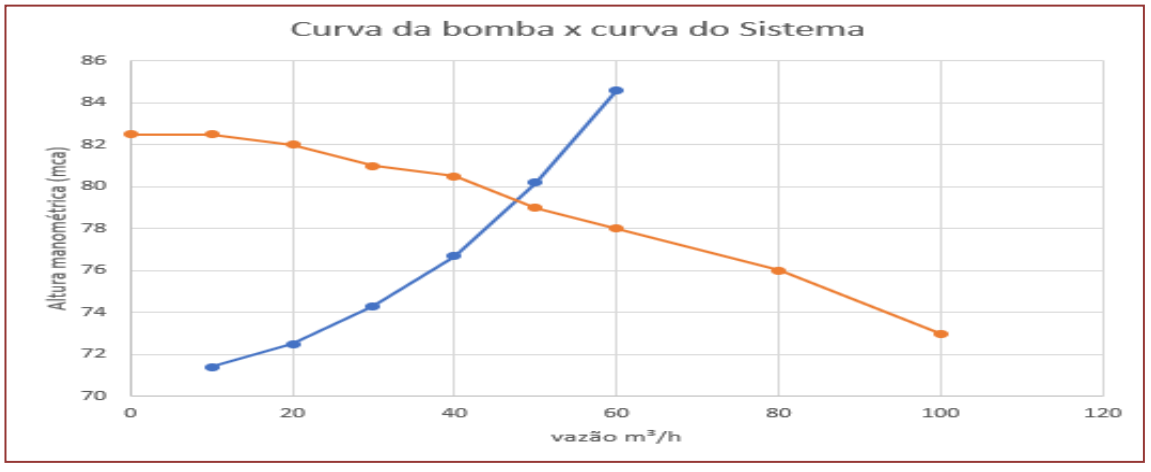
Figura 4: Curva Característica do sistema fluidodinâmico simulado, com uma bomba hidráulica



Fonte: Autores, 2024.

A sobreposição das figuras 3 e 4 são demonstradas na figura 05. Na figura 5 observa-se um ponto de interseção entre a curva da bomba com a curva do sistema. Essa interseção ocorreu a aproximadamente a vazão de 49 m³/h com altura manométrica de 79 mca, e forneceu o seguinte indicativo. O melhor rendimento operacional do sistema de bombeamento simulado ocorreu até a vazão de 49 m³/h; pois não comprometeu o princípio de funcionamento do maquinário o qual se evita a ocorrência de cavitação. Tal análise se baseia no descrito por HENN (2012) sobre a formação de bolhas de cavitação em bombas hidráulicas. Mesmo que se aumentasse a vazão acima de 49 m³/h não haveria efetivo funcionamento da bomba hidráulica e ainda comprometeria a integridade dos componentes internos devido à ocorrência de cavitação.

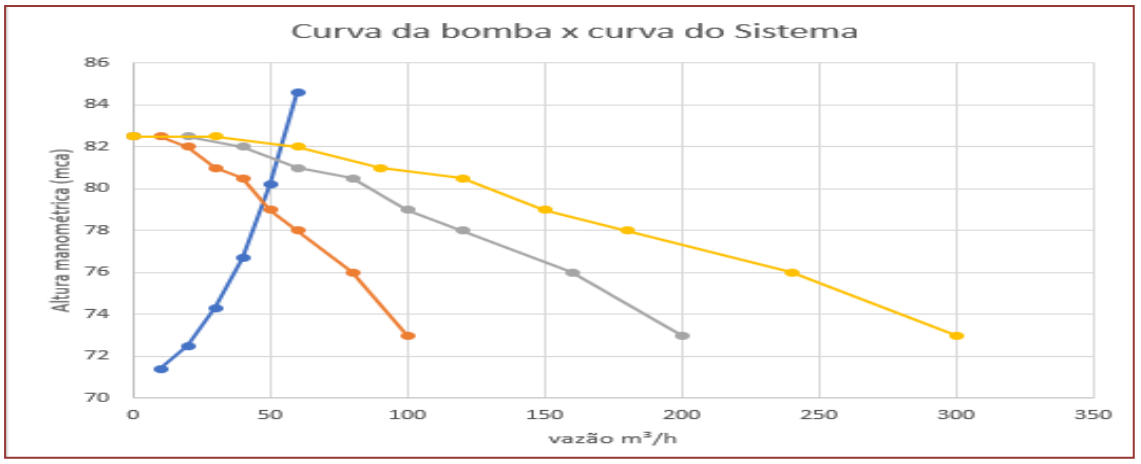
Figura 5: Relação entre a curva da bomba e a curva do sistema



Fonte: Autores, 2024.

A figura 6 apresenta a simulação computacional ampliando-a para duas e três bombas funcionando em paralelo, já acrescida da inserção da curva do sistema. Nesta figura se observou que com a utilização de duas bombas hidráulicas em paralelo obteve-se um ganho operacional: o ponto de interseção ocorreu com uma vazão de 51 m^3/h e 81 mca. Contudo ao se utilizar três bombas hidráulicas em paralelo, não se observou ganho operacional que justificasse a sua utilização: a interseção ocorreu com vazão de 55 m^3/h e 82 mca. Esse último resultado indicou que para as condições em que ocorreu a simulação computacional o uso de uma terceira bomba hidráulica em paralelo seria desnecessária. Apenas ocasionaria um consumo energético maior sem uma eficiência aparente de operação.

Figura 6: Sobreposição de curvas características sobrepostas à curva do sistema. Bombas hidráulicas em paralelo: uma, duas e três



Curva do sistema **Curva 1 bomba** **Curva 2 bombas** **Curva 3 bombas**

Fonte: Autores, 2024.

A simulação computacional foi realizada a partir da adoção de uma curva característica para bomba hidráulica conforme descrita na figura 7. Neste caso considerou-se uma bomba hidráulica que opera com 1780 RPM e possui um rotor com 394mm de diâmetro. As informações constantes nos Quadros 1 e 2 foram extraídos da figura 2.

Quadro 1: Curva do sistema

Q (m^3/h)	H (mca)
10	71,4
20	72,5
30	74,3
40	76,7
50	80,2
60	84,6

Quadro 2: Curva da bomba à 1780 RPM, rotor de 394 mm

Q (m^3/h)	H (mca)
0	82,3
10	82,3
20	82
30	81
40	80,5
50	79
60	78
80	76
100	73

O Quadro 3 apresenta a curva da bomba operando a 1700 RPM, utilizando um rotor com diâmetro de 394 mm conforme as equações 1 e 2. Nesse cenário, observou-se redução de aproximadamente 5% na rotação do rotor. Já no Quadro 4, a bomba opera a uma rotação de 1600 RPM, o que resultou em redução de aproximadamente 10% na rotação do rotor.

Quadro 3: Curva da bomba à 1700 RPM, rotor de 394 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	75
9,5	75
19,1	74,8
28,65	73,9
38,2	73,4
47,75	72
57,3	71,1
76,4	69,3
95,5	66,5

Quadro 4: Curva da bomba à 1600 RPM, rotor 394 mm

Q(m³/h)	H (mca)
0	66,5
9	66,5
18	66,2
27	65,4
35,9	65
44,9	63,8
53,9	63
71,9	61,4
89,9	59

O Quadro 5 apresenta a curva da bomba operando a 1500 RPM, utilizando um rotor com diâmetro de 394 mm, conforme as equações 1 e 2. Nesse cenário, observou-se uma redução de aproximadamente 14% na rotação do rotor. Já no Quadro 6, a bomba opera a uma rotação de 1424 RPM, resultando em uma redução de aproximadamente 20% na rotação do rotor.

Quadro 5: Curva da bomba à 1500 RPM, rotor de 394mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	58,4
8,4	58,4
16,8	58,2
25,3	57,5
33,7	57,2
42,1	56,1
50,7	55,4
67,4	54
84,3	51,8

Quadro 6: Curva da bomba à 1424 RPM, rotor de 394 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	52,7
8	52,7
16	52,5
24	51,8
32	51,5
40	50,5
48	49,9
64	48,6
80	46,7

O quadro 7 representa a curva do sistema enquanto o quadro 8 representa a curva da bomba à 1780 RPM utilizando um rotor com diâmetro de 416 mm.

Quadro 7: Curva do sistema

Q (m³/h)	H (mca)
10	71,4
20	72,5
30	74,3
40	76,7
50	80,2
60	84,6

Quadro 8: Curva da bomba à 1780 RPM, rotor de 416 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	93
20	92
40	90,6
60	88,2
80	85
100	81
120	76

O Quadro 9 apresenta a curva da bomba operando a 1700 RPM, utilizando um rotor com diâmetro de 416 mm, conforme as equações 1 e 2. Nesse cenário, observamos uma redução de aproximadamente 5 % na rotação do rotor. Já no Quadro 10, a bomba opera a uma rotação de 1600 RPM, resultando em uma redução de aproximadamente 10% na rotação do rotor.

Quadro 9: Curva da bomba à 1700 RPM, rotor de 416 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	84,5
19,1	83,9
38,2	82,6
57,3	80,4
76,4	77,5
95,5	73,9
114,6	69,3

Quadro 10: Curva da bomba à 1600 RPM, rotor de 416 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	75,1
17,9	74,3
35,9	73,2
53,9	71,3
71,9	68,7
89,9	65,4
107,8	61,4

O Quadro 11 apresenta a curva da bomba operando a 1500 RPM, utilizando um rotor com diâmetro de 416 mm, conforme as equações 1 e 2. Nesse cenário, observou-se uma redução de aproximadamente 14% na rotação do rotor. Já no Quadro 12, a bomba opera a uma rotação de 1424 RPM, resultando em uma redução de aproximadamente 20% na rotação do rotor.

Quadro 11: Curva da bomba à 1500 RPM, rotor de 416 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	66
16,8	65,3
33,7	64,3
50,6	62,6
67,4	60,4
84,2	57,5
101,1	54

Quadro 12: Curva da bomba à 1424 RPM, rotor de 416 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	59,5
16	58,9
32	58
48	56,4
64	54,4
80	51,8
96	48,6

O quadro 13 representa a curva do sistema enquanto o quadro 14 representa a curva da bomba à 1780 RPM utilizando um rotor com diâmetro de 438 mm.

Quadro 13: Curva do sistema

Q (m^3/h)	H (mca)
10	71,4
20	72,5
30	74,3
40	76,7
50	80,2
60	84,6
80	89

Quadro 14: Curva da bomba a 1780 RPM, rotor de 438 mm

Q (m^3/h)	H (mca)
0	103
20	102,9
40	102
60	100
80	96,9
100	93
120	88

O Quadro 15 apresenta a curva da bomba operando a 1700 RPM, utilizando um rotor com diâmetro de 438 mm, conforme as equações 1 e 2. Nesse cenário, observou-se uma redução de aproximadamente 5 % na rotação do rotor. Já no Quadro 16, a bomba opera a uma rotação de 1600 RPM, resultando em uma redução de aproximadamente 10% na rotação do rotor.

Quadro 15: Curva da bomba à 1700 RPM, rotor de 438 mm

Q (m^3/h)	H (mca)
0	93,9
19,1	93,8
38,2	93
57,3	91,2
76,4	88,3
95,5	84,8
114,6	80,3

Quadro 16: Curva da bomba à 1600 RPM, rotor de 438 mm

Q (m^3/h)	H (mca)
0	83,2
18	83,1
35,9	82,4
53,9	80,8
71,9	78,3
89,9	75,1
107,8	71,1

O Quadro 17 apresenta a curva da bomba operando a 1500 RPM, utilizando um rotor com diâmetro de 438 mm, conforme as equações 1 e 2. Nesse cenário, observou-se uma redução de aproximadamente 14% na rotação do rotor. Já no Quadro 18, a bomba opera a uma rotação de 1424 RPM, resultando em uma redução de aproximadamente 20% na rotação do rotor.

Quadro 17: Curva da bomba à 1500 RPM, rotor de 438 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	73,1
16,8	73,07
33,7	72,4
50,7	71
67,4	68,8
84,3	66
101,1	62,5

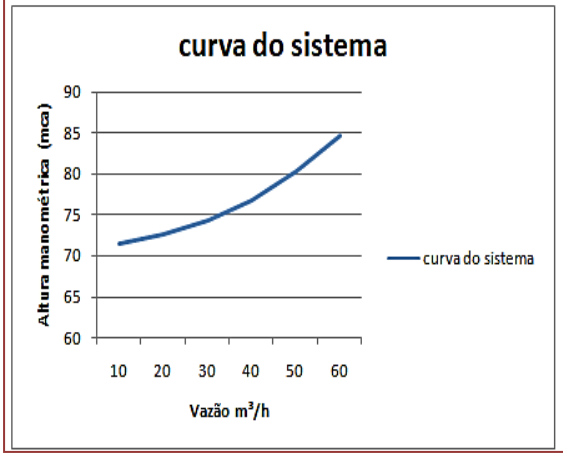
Quadro 18: Curva da bomba à 1424 RPM, rotor de 438 mm

Q (m³/h)	H (mca)
0	65,9
16	65,8
32	65,3
48	64
64	62
80	59,5
96	56,3

A partir dos resultados para o sistema fluidodinâmico simulado demonstrou-se graficamente todas as curvas levantadas. A figura 2 apresenta o resultado gráfico da curva do sistema. Nessa curva observou-se que o aumento da vazão no sistema como um todo para o bombeamento de bombas hidráulicas com tendência parabólica, demonstra como esse aumento influencia na altura manométrica, principalmente para elevadas vazões.

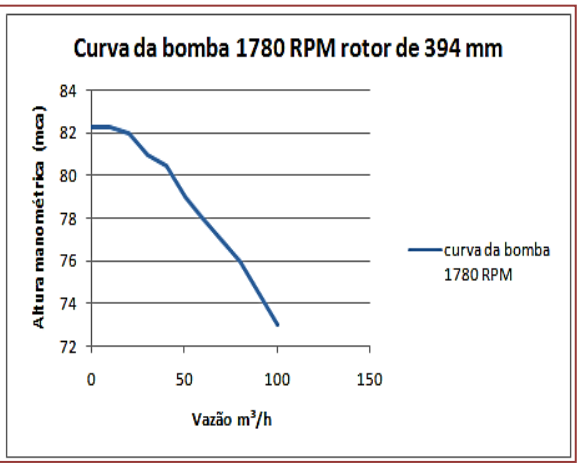
A figura 8 mostra o comportamento das bombas hidráulicas durante o ciclo de operação. Observa-se nesta figura que a curva da bomba com rotor de 394 mm possui formato oposto ao do sistema, conforme demonstrado na figura 2. Ao se analisar, particularmente uma bomba ela possui a máxima elevação com a mínima vazão, que é quantificada pelo fabricante. Conforme os ciclos de operação há o declínio da altura manométrica alcançada conforme no aumento da vazão, pois a uma perda de energia do fluido devido ao atrito, essas perdas resultam em menos energia disponível para converter energia cinética em energia hidráulica ou de pressão.

Figura 7: Curva do Sistema



Fonte: Autores, 2024.

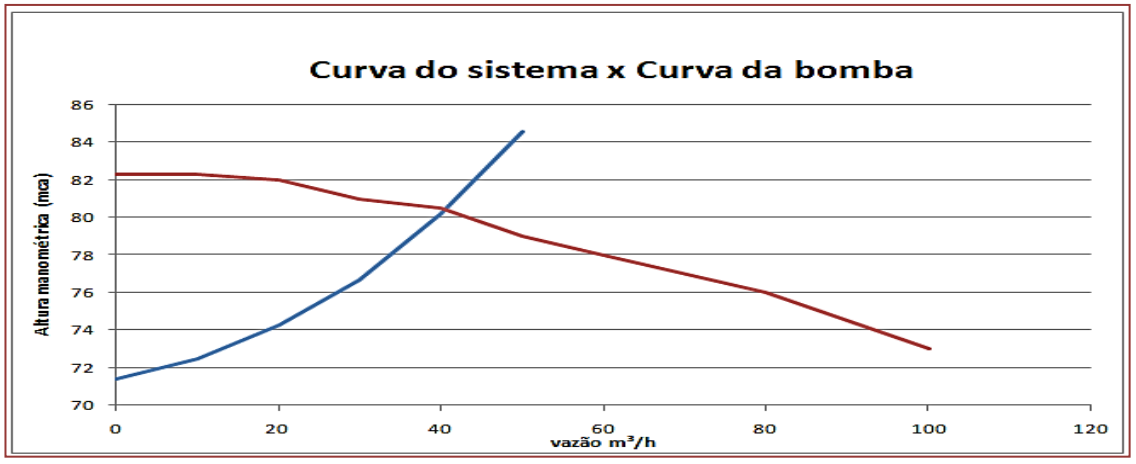
Figura 8: Curva da Bomba



Fonte: Autores, 2024.

A sobreposição das figuras 7 e 8 são demonstradas na figura 9. Na figura 4 observou-se um ponto de interseção entre a curva da bomba com a curva do sistema. Essa interseção ocorreu a aproximadamente a vazão de 40 m^3/h com altura manométrica de 80,5 mca, e forneceu o seguinte indicativo. O melhor rendimento operacional do sistema de bombeamento simulado ocorreu até a vazão de 40 m^3/h; pois não comprometeu o princípio de funcionamento do maquinário o qual se evita a ocorrência de cavitação. Tal análise se baseia no descrito por Henn (2012) sobre a formação de bolhas de cavitação em bombas hidráulicas. Mesmo que se aumentasse a vazão acima de 40 m^3/h não haveria efetivo funcionamento da bomba hidráulica e ainda comprometeria a integridade dos componentes internos devido à ocorrência de cavitação.

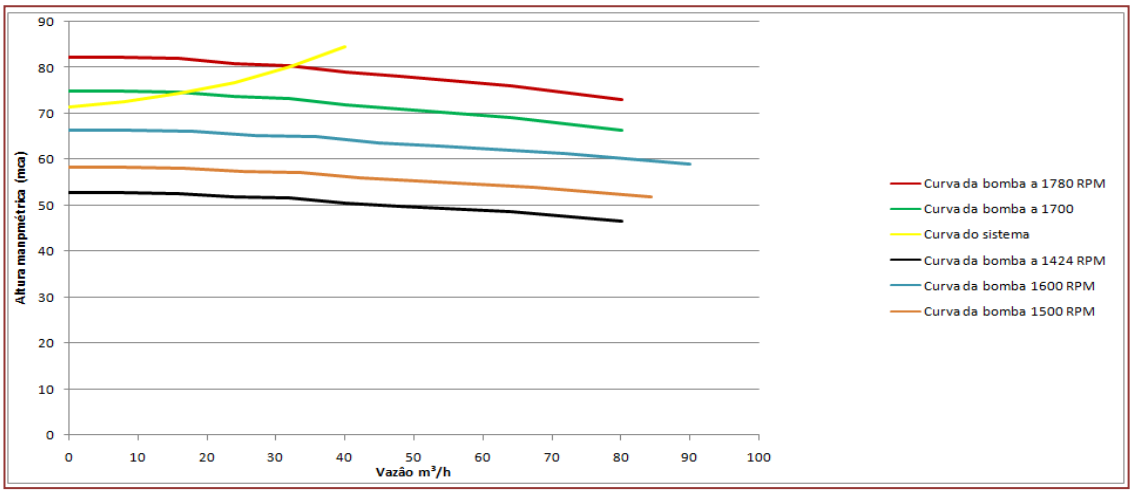
Figura 9: Curva do Sistema x Curva da Bomba



Fonte: Autores, 2024.

A Figura 10 apresenta a curva do sistema sobreposta às curvas da bomba operando em diferentes rotações. Ao analisarmos essa figura, observou-se que as curvas correspondentes às rotações de 1700 RPM e 1780 RPM atenderam aos requisitos do sistema, uma vez que houve interseção entre a curva do sistema e as curvas da bomba nessas rotações. As demais curvas presentes no gráfico não satisfizeram as necessidades do sistema, pois não apresentaram pontos de interseção com a curva do sistema.

Figura 10: Altura Manométrica x Vazão

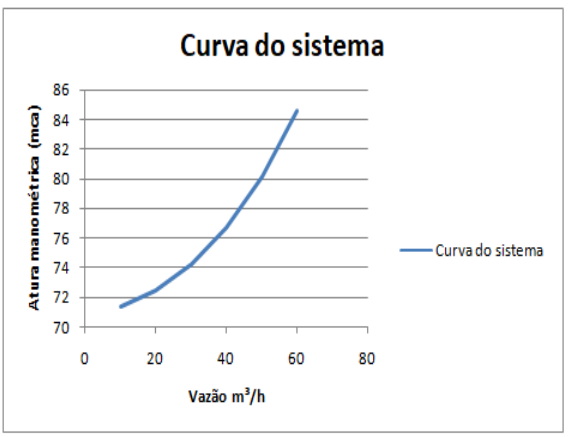


Fonte: Autores, 2024.

A figura 11 apresenta o resultado gráfico da curva do sistema. A partir do demonstrado na figura 11 observou-se que o aumento da vazão no sistema como um todo para o bombeamento de bombas hidráulicas com tendência parabólica, demonstra como esse aumento influencia na altura manométrica, principalmente para elevadas vazões.

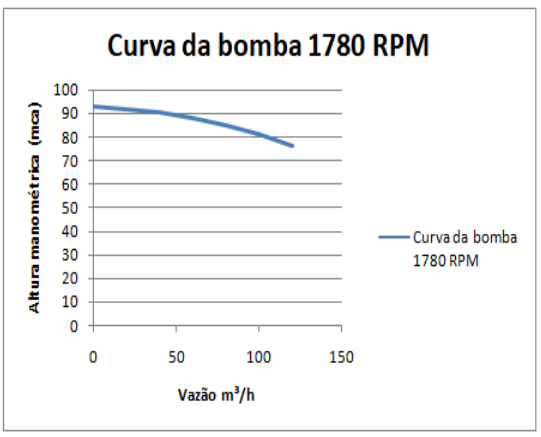
A figura 12 mostra o comportamento das bombas hidráulicas durante o ciclo de operação. Observa-se nesta figura que a curva da bomba com rotor de 416 mm possui formato oposto ao do sistema, conforme demonstrado na figura 06. Ao se analisar, particularmente uma bomba ela possui a máxima elevação com a mínima vazão, que é quantificada pelo fabricante. Conforme os ciclos de operação há o declínio da altura manométrica alcançada conforme no aumento da vazão.

Figura 11: Curva do Sistema



Fonte: Autores, 2024.

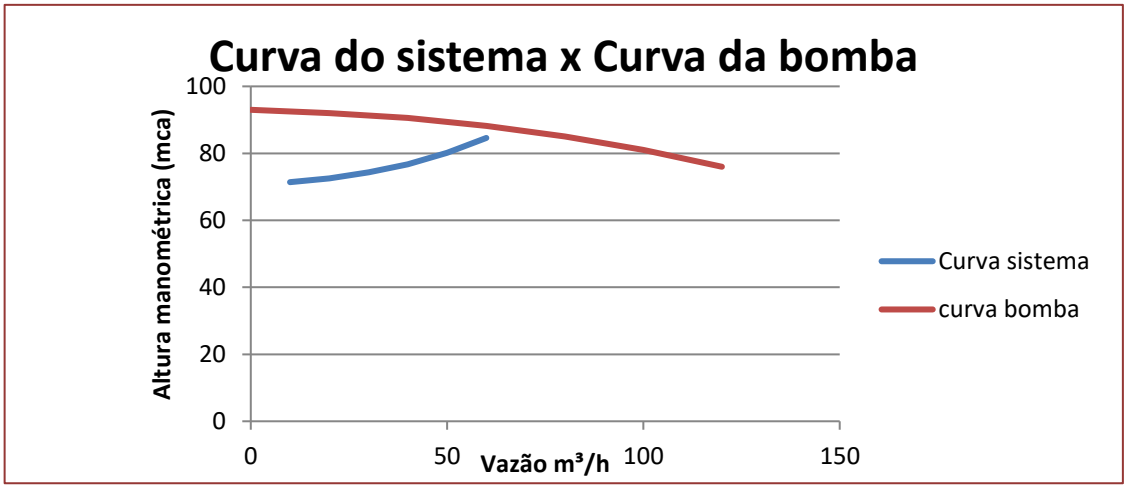
Figura 12: Curva da Bomba



Fonte: Autores, 2024.

A sobreposição das figuras 11 e 12 são demonstradas na figura 13; e observou-se. um ponto de interseção entre a curva da bomba com a curva do sistema. Essa interseção ocorreu a aproximadamente a vazão de 60 m^3/h com altura manométrica de 88 mca, e forneceu o seguinte indicativo. O melhor rendimento operacional do sistema de bombeamento simulado ocorreu até a vazão de 60 m^3/h; pois não comprometeu o princípio de funcionamento do maquinário o qual se evita a ocorrência de cavitação. Tal análise se baseia no descrito por Henn (2012) sobre a formação de bolhas de cavitação em bombas hidráulicas. Mesmo que se aumentasse a vazão acima de 60 m^3/h não haveria efetivo funcionamento da bomba hidráulica e ainda comprometeria a integridade dos componentes internos devido à ocorrência de cavitação.

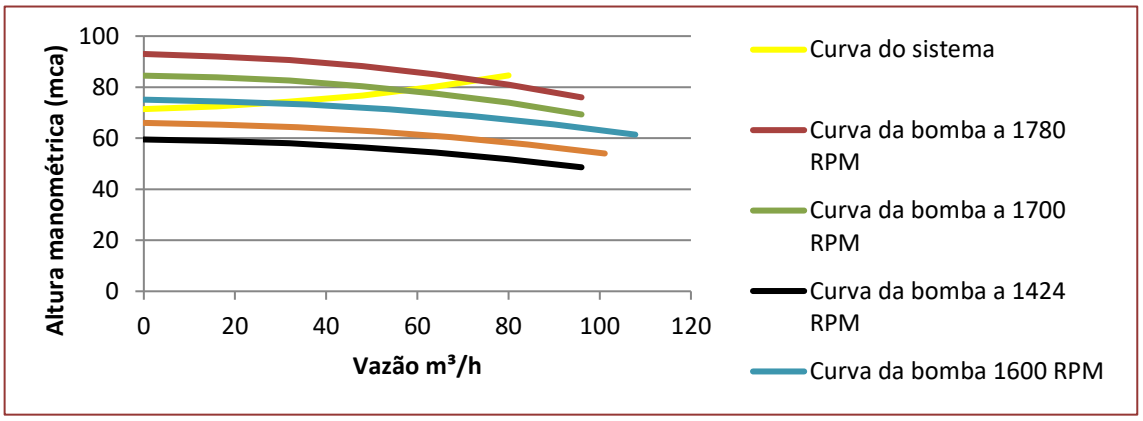
Figura 13: Curva do Sistema x Curva da Bomba



Fonte: Autores, 2024.

A Figura 14 apresenta a curva do sistema sobreposta às curvas da bomba operando em diferentes rotações. Ao analisarmos essa figura, podemos observar que as curvas correspondentes às rotações de 1600 RPM, 1700 RPM e 1780 RPM atendem aos requisitos do sistema, uma vez que há interseção entre a curva do sistema e as curvas da bomba nessas rotações. As demais curvas presentes no gráfico não satisfazem as necessidades do sistema, pois não apresentam pontos de interseção com a curva do sistema.

Figura 14: Altura Manométrica x Vazão

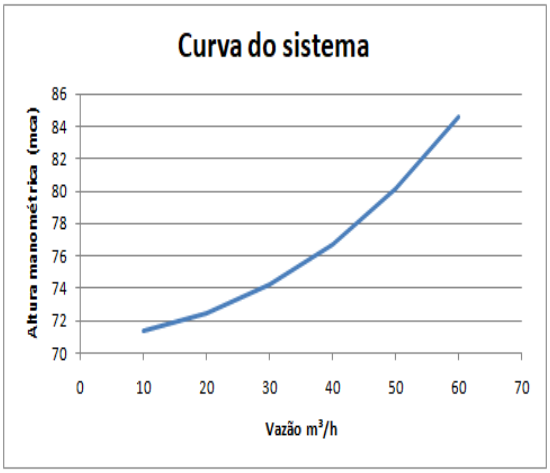


Fonte: Autores, 2024.

A figura 15 apresenta o resultado gráfico da curva do sistema. A partir do demonstrado na figura 15 observou-se que o aumento da vazão no sistema como um todo para o bombeamento de bombas hidráulicas com tendência parabólica, demonstra como esse aumento influencia na altura manométrica, principalmente para elevadas vazões.

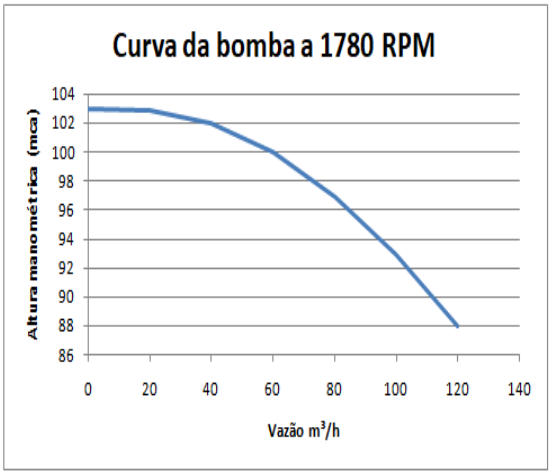
A figura 16 mostra o comportamento das bombas hidráulicas durante o ciclo de operação. Observa-se nesta figura que a curva da bomba com rotor de 438 mm possui formato oposto ao do sistema, conforme demonstrado na figura 10. Ao se analisar, particularmente uma bomba ela possui a máxima elevação com a mínima vazão, que é quantificada pelo fabricante. Conforme os ciclos de operação há o declínio da altura manométrica alcançada conforme no aumento da vazão.

Figura 15: Curva do Sistema



Fonte: Autores, 2024.

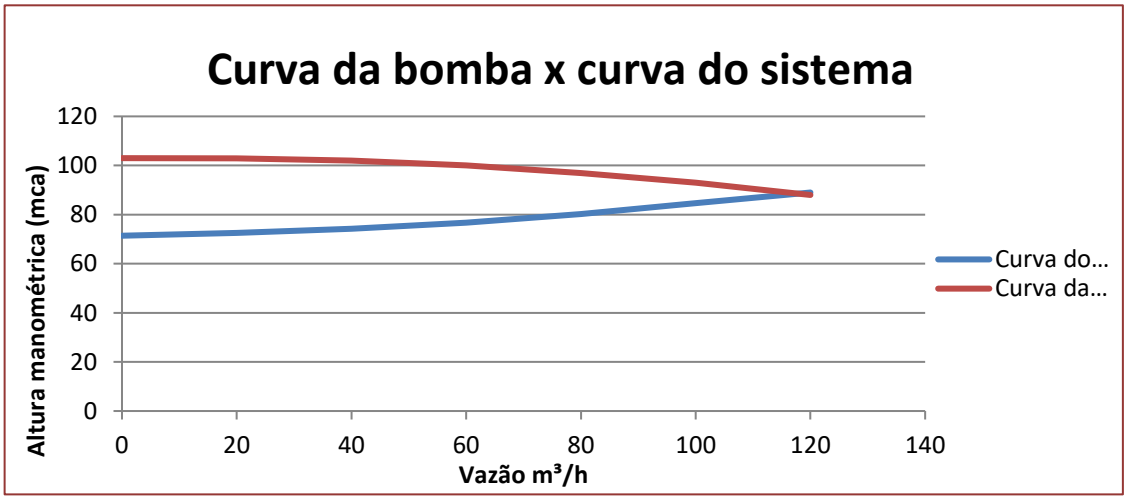
Figura 16: Curva da Bomba



Fonte: Autores, 2024.

A sobreposição das figuras 15 e 16 são demonstradas na figura 17. Na figura 17 observa-se um ponto de interseção entre a curva da bomba com a curva do sistema. Essa interseção ocorreu a aproximadamente a vazão de 120 m^3/h com altura manométrica de 90 mca, e forneceu o seguinte indicativo. O melhor rendimento operacional do sistema de bombeamento simulado ocorreu até a vazão de 120 m^3/h; pois não comprometeu o princípio de funcionamento do maquinário o qual se evita a ocorrência de cavitação. Tal análise se baseia no descrito por Henn (2012) sobre a formação de bolhas de cavitação em bombas hidráulicas. Mesmo que se aumentasse a vazão acima de 120 m^3/h não haveria efetivo funcionamento da bomba hidráulica e ainda comprometeria a integridade dos componentes internos devido à ocorrência de cavitação.

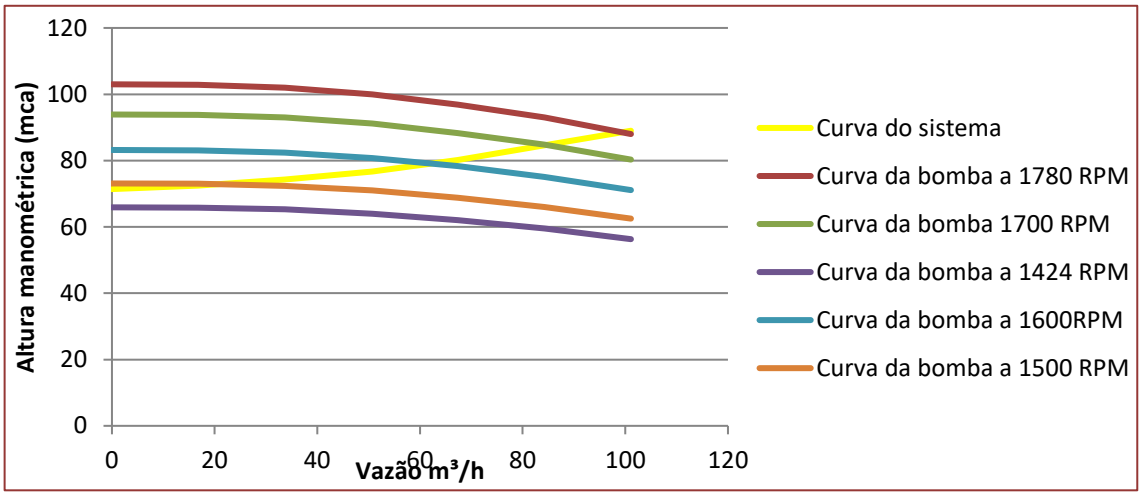
Figura 17: Curva da Bomba x Curva do Sistema



Fonte: Autores, 2024.

A Figura 18 apresenta a curva do sistema sobreposta às curvas da bomba operando em diferentes rotações. Ao analisarmos essa figura, podemos observar que as curvas correspondentes às rotações de 1500 RPM, 1600 RPM, 1700 RPM e 1780 RPM atendem aos requisitos do sistema, uma vez que há interseção entre a curva do sistema e as curvas da bomba nessas rotações. As demais curvas presentes no gráfico não satisfazem as necessidades do sistema, pois não apresentam pontos de interseção com a curva do sistema.

Figura 18: Altura Manométrica x Vazão



Fonte: Autores, 2024.

Os gráficos apresentados nas figuras de 7 a 18 representam os resultados das várias simulações computacionais realizadas, ao utilizar as equações matemáticas descritas de 1 a 3; a partir de variação de parâmetros operacionais das bombas hidráulicas. Todos os resultados obtidos demonstraram que as bombas centrífugas devem operar dentro de seu ponto de equilíbrio satisfatório de funcionamento dentro do especificado pelo fabricante. Ou seja, sem colocá-la em sacrifício operacional. Cabe ressaltar que embora uma mesma bomba hidráulica possa trabalhar em diversas faixas de operação, nem todas as faixas atenderão ao sistema de bombeamento. Essa observação ficou demonstrada e evidente nas figuras 10 e 18 que a curva do sistema não interceptou todas as curvas da bomba, o que confirmou tal assertiva.

Outro modo de confirmar o que se constatou através da simulação computacional, foi à comparação realizada entre a curva do sistema com a curva da bomba ao operá-la com diferentes diâmetros de rotor em diferentes faixas de operação. Os resultados indicaram que a curva da bomba com um rotor de menor diâmetro apresentou menor ponto de interseção com o sistema do que a mesma bomba com um rotor de maior diâmetro ao operá-lo na mesma faixa de rotação, conforme demonstrado nas figuras 10 e 18. Isso ocorreu porque rotores maiores têm uma área de ação maior e uma maior velocidade tangencial das pás.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática e simulação computacional se mostrou eficiente para apresentar a importância dessa ferramenta como indicação para a tomada de decisão e análise do sistema. Os programas utilizados Mathway e Excel propiciaram análise dos resultados obtidos pela simulação, e apresentaram similitudes com resultados descritos na literatura, mesmo ao realizar algumas considerações no desenvolvimento.

Os resultados obtidos demonstraram que a relação entre a vazão e altura manométrica ótima de operação não colapsaria a bomba hidráulica, pela formação de bolhas de cavitação que comprometeriam todo o funcionamento do conjunto moto-bomba. Outro resultado importante obtido foi que o acréscimo de duas para três bombas hidráulicas

não surtiria o efeito desejado, uma vez que pouco acrescentaria um ganho efetivo de operação. Diante disso, o uso de uma terceira bomba hidráulica em paralelo, apenas seria indicado quando uma das duas que estivessem em operação fosse para a manutenção.

O controle de vazão em sistemas de bombas centrífugas através de mudanças na geometria e métodos de controle, como a instalação de válvulas na linha de recalque, a variação da velocidade de rotação e a recirculação do fluido para a sucção, demonstrou ser uma abordagem eficiente para ajustar o ponto de operação do sistema de bombeamento. Esses métodos permitiram que uma mesma bomba funcione em diferentes pontos de operação, aumentando a flexibilidade do sistema.

A redução da velocidade de rotação diminuiu significativamente o consumo de potência da bomba centrífuga. A capacidade de ajustar a velocidade da bomba foi benéfica em aplicações onde a demanda variasse o qual permitiria uma operação mais eficiente e econômica.

No entanto, em sistemas com *head* estático elevado e poucas perdas de carga, a variação de rotação necessária para ajustar o ponto de operação é limitada. Nesses casos, as curvas de desempenho da bomba podem não corresponder adequadamente às necessidades de bombeamento, devido às restrições na diminuição da rotação e aos limitados ganhos em energia hidráulica.

Embora a variação da velocidade de rotação ofereça benefícios significativos em termos de eficiência energética, é essencial considerar as características específicas do sistema, como o *head* estático e as perdas de carga, ao projetar e operar sistemas de bombeamento com controle de vazão. Uma análise cuidadosa e um balanceamento entre os métodos de controle disponíveis são necessários para garantir a eficiência e a eficácia do sistema de bombeamento em diferentes condições operacionais.

REFERÊNCIAS

[1] BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Ed. Pearson Prentice Hall, 2ª Reimpr., 431p., 209.

[2] CAMPOS, Mario C.; TEIXEIRA, Helbert C.; **Controles típicos de equipamentos e processos industriais**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher LTDA, 2° ed.,396 p., 2010.

[3] DeFALCO, R.; MATTOS, Edasone E.; **Bombas Industriais**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 1° ed, 474 p., 1998.

[4] FOX, Robert w.; MCDONALD, Alant.; PRITCHARD, Philipj.; **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Ed.Gen LTC, 8° ed., 1018., 2010.

[5] Google Maps. **Google Maps**. Disponível em: https://www.google.com.br/maps/place/Esta%C3%A7%C3%A3o+de+Tratamento+de+%C3%81gua+-+ETA+Nova/@-22.5363861,-44.1843114,660m/data=!3m2!1e3!4b1!4m6!3m5!1s0x9e9b1db8f75435:0x40f0bc8ec6873110!8m2!3d-22.5363911!4d-44.179698!16s%2Fg%2F11pv3h4664?entry=ttu&g_ep=EgoyMDI0MTExNy4wIKXMDSoJLDEwMjExMjMzSAFQAw%3D%3D >.Acessado em: 08/08/2023.

[6] HENN, Érico A.L. **Máquinas de Fluxo**. Santa Maria: Ed. UFSM, 3° ed., 495 p., 2012.

[7] LIMA, Epaminondas P.C. **Mecânica das Bombas**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2° ed.,610 p., 2003.

[8] MATHIAS, Artur C. **Válvulas industriais, segurança, controle: tipos, seleção, dimensionamento**. São Paulo: Ed. Artliber, 2° ed., 552 p., 2014.

[9] RIBEIRO, F. K. C. **Estudo sobre bombas em paralelo buscando a comprovar ganhos operacionais e energéticos com regulação PID em inversores de frequência**. 2018. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia Elétrica, Faculdade Doctum Juiz de Fora, 2018.

[10] SANTOS, Sérgio L. dos. **Bombas & Instalações Hidráulicas**. São Paulo: Ed. LCTE, 1ª Ed., 253p., 2007.

[11] SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Clause e VAN WYLEN, Gordon J. **Fundamentos de Termodinâmica**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 6ª Ed., 577p., 2003.

[12] TEIXEIRA, Mariane M. **Equação de Bernoulli**. Mundo Educação, 2023. Disponível em: <https:// mundo educacao.uol.com.br/fisica/equacao-bernoulli.htm> . Acesso em: 22 de abril de 2023.

[13] VERDE, Willian M. **Máquinas de Fluxo**. Londrina: Ed. Educacional S.A, 1° ed., 248p., 2018

[14] **_____PROCEL, INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE**: Guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília: IEL/NC, 2008.

[15] **_____PROCEL, BOMBAS**: guia básico / Eletrobrás [et al.]. Brasília: IEL/NC, 2009.

Capítulo 9

Aplicação da Metodologia Paver para análise de condição do pavimento em trecho da RN-233

Wendel Silva Cabral

Resumo: As vias influenciam nos aspectos econômicos e sociais de uma determinada região, onde muitas estradas não tem uma política de conservação e manutenção, fazendo com que a infraestrutura pública rodoviária brasileira seja afetada com a baixa qualidade dos seus pavimentos. Agravada pela falta de recursos, faz-se necessário à implementação de um sistema de gerência de pavimentos, destinando de forma mais econômica os recursos disponíveis para os cuidados dessas estruturas, fazendo a priorização de pavimentos que estão em condições mais precárias. Este trabalho apresenta um estudo acerca dos defeitos superficiais em uma seção (trecho) de pista e sua avaliação, por meio da metodologia Paver, desenvolvida pelo *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE). Fundamentada no Índice de Condição do Pavimento (PCI) identifica-se o defeito presente no pavimento, sua severidade e depois é feito o cálculo do PCI. A metodologia foi aplicada em um trecho com extensão de 1.130m da RN-233, que interliga a rotatória da cidade de Caraúbas/ RN à entrada da Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Os resultados mostram a avaliação da porção da estrada estudada, além da priorização necessária de intervenções nas Unidades de Amostras analisadas, onde tais análises auxiliarão na redução do desperdício dos recursos públicos em serviços de manutenção.

Palavras-chave: Pavimento, Avaliação, Metodologia Paver, Manutenção.

1. INTRODUÇÃO

A evolução das estradas está diretamente relacionada à necessidade de sobrevivência dos seres humanos. Para atender condições mínimas de resistências as adversidades, os homens pré-históricos precisavam se deslocar para outros lugares em busca de água e demais suprimentos para a sua existência. Com o passar do tempo foi surgindo à necessidade de fazer melhorias no trajeto para que esse deslocamento ocorresse de forma mais fácil e rápida, sendo criados mecanismos e técnicas construtivas para atender a demanda crescente por estas estruturas.

Do uso de animais, passando por execuções de aterros de regiões mais baixas, utilizando revestimentos de pedras e concretos, dentre outras técnicas, foi originando-se a área da pavimentação, a fim de possibilitar o melhor deslocamento em qualquer época do ano. Silva (2008) define pavimentação como a estrutura constituída sobre um terreno de fundação, a qual deverá resistir à ação das cargas de roda dos veículos e as ações do tempo.

As estradas têm um envolvimento direto com os aspectos econômicos e sociais do espaço de uma determinada região. Estas auxiliam no processo de trocas de mercadorias, além de outros tantos benefícios, e sua evolução se dá devido ao processo de povoamento e desenvolvimento de cada localidade.

A infraestrutura pública rodoviária brasileira é afetada com a baixa qualidade de seus pavimentos, fato este que prejudica o país ao longo de toda malha rodoviária. De acordo com uma pesquisa feita pela Confederação Nacional dos Transportes CNT (2024), 73,5% do sistema rodoviário brasileiro apresenta algum tipo de deficiência na sua estrutura.

Infelizmente o cuidado e atenção com as rodovias não são frequentes. Muitas não têm uma política de conservação e manutenção, o que reflete na condição superficial do pavimento que com o tempo vem a apresentar imperfeiçoes, como: deformações permanentes, trincas, fissuras, entre outros defeitos, comprometendo sua qualidade, ocasionando diversos transtornos à população, como acidentes, danos aos veículos, desconforto, aumento de custos com transportes consequentemente influenciando no aumento dos preços de produtos, devido ao encarecimento principalmente do frete.

Os Sistemas de Gerência de Pavimentos são ferramentas capazes de reduzirem a dimensão dos problemas no gerenciamento de vias urbanas, através da otimização de atividades com o melhor rendimento possível para que os recursos alocados nas mesmas possibilitem o aumento da eficácia dos organismos gestores. Segundo Haas et al. (1994) um Sistema de Gerência de Pavimentos consiste em um conjunto amplo e coordenado de atividades associadas com planejamento, projeto, construção, manutenção, avaliação e pesquisa de pavimentos".

Entre os anos de 2013 e 2023, a extensão da malha rodoviária de jurisdição federal pavimentada cresceu apenas 2,2%. Em termos de distribuição regional dessa malha, a região Nordeste é a que possui maior participação com 31,1% da extensão federal pavimentada. (CNT, 2024). Tais resultados evidenciam a necessidade de adoção de um serviço de manutenção. A correção rotineira desses defeitos e a manutenção contínua ajudam a preservar a vida útil dos pavimentos, sempre deixando os mesmos em boas condições de utilização, oferecendo conforto e segurança aos usuários e evitando possíveis gastos e transtornos com a necessidade de refazer o pavimento causando assim a racionalização dos custos operacionais nas rodovias.

Um bom diagnóstico da condição superficial é essencial para a melhor escolha de uma alternativa de restauração, visando sempre manter o pavimento em boas condições de

utilização e auxiliando na melhor utilização dos recursos destinados a infraestrutura das rodovias.

A partir disto, esta pesquisa apresenta a aplicação da metodologia paver de análise de defeitos, baseada no cálculo do PCI e desenvolvida para pavimentos asfálticos, em trecho da rodovia RN233. Realizar a avaliação, indicação da severidade, para auxiliar no entendimento e conhecimento da presente condição do pavimento em estudo. Além disso, sugerir, baseado nos resultado obtidos, a priorização das intervenções nas unidades de amostra (UA) que precisam de priorização de intervenção.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRICO DA PAVIMENTAÇÃO

A evolução da pavimentação caminha lado a lado com o desenvolvimento da humanidade. Com a construção das estradas os seres humanos foram evoluindo, conquistando outros territórios, fortalecendo as relações comerciais e conhecendo outras culturas.

Com o intuito de aumentar cada vez mais as suas riquezas, os romanos desenvolveram técnicas de pavimentação, que constituía na construção de fundações com grandes pedras, uma camada de areia, limalha de ferro e pedregulho, esse método fez com que as estradas crescessem de forma rápida. A via mais conhecida construída pelos Romanos é a via Ápia.

A evolução das estradas no Brasil se deu através da construção de estradas de pedras, um exemplo dessas estradas é a estrada real ou caminho de ouro, que foi criada com o objetivo de fazer o transporte do ouro extraído nas minas durante o século XVIII. Com o passar do tempo tornou-se necessária à construção de caminhos mais modernos, daí surgiu a primeira rodovia pavimentada do Brasil que liga a cidade do Rio de Janeiro à Petrópolis, a estrada recebeu o nome de Washington Luis.

2.1.1. SITUAÇÃO DO PAVIMENTO NO BRASIL

O Brasil conta com uma quantidade bastante escassa de sua malha rodoviária pavimentada, a preocupação com os investimentos em serviços básicos como a pavimentação é bem inferior ao necessário. Levantamentos da Confederação Nacional de Transportes (CNT) considerou a maioria dos pavimentos do Brasil de baixo conforto ao rolamento. Segundo dados da (CNT 2024) o Brasil possui 1.720.909 km de rodovias onde somente 12,4% são pavimentadas e 87,6% ainda não passaram por esse processo de pavimentação.

Nos últimos dez anos a malha rodoviária Brasileira teve um crescimento de 2,2%. A maior percentagem de área pavimentada se encontra na região Nordeste que tem cerca de 31,1% da sua extensão pavimentada, no entanto nesses últimos dez anos não teve um crescimento satisfatório. Em um extensão de 1.881km de vias pavimentadas pesquisados pelo CNT (2024), em um total aproximado de 4.376km, o Rio Grande do Norte apresentou um estado geral de 26km ótimo, 546km bom, 788km regular, 196km ruim e 325km péssimo.

A fim de recuperar e ampliar as rodovias foi criada a CIDE (Confederação de Intervenção no Domínio econômico, Lei n° 10.336, 19 de dezembro de 2001), que são tributos pagos

pelos brasileiros, onde uma parte dos mesmos deve ser destinada para programas de financiamento de infra-estrutura dos transportes.

2.2 PAVIMENTAÇÃO

Os pavimentos são partes essenciais da infraestrutura de um país e auxiliam no seu desenvolvimento e crescimento. Devido ao solo natural não ser satisfatório para resistir a transição diária dos meios de transporte, é feito a construção de uma superfície mais rígida e regular para que o tráfego possa fluir de forma mais rápida, segura e confortável.

Bernucci et. Al (2006) afirma que o pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir os esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Ao se expressar uma preocupação com a camada superficial do pavimento, os benefícios são refletidos para a população, ocorrendo assim a redução com gastos operacionais, com acidentes e custos com combustível. Segundo Balbo (2007), seleciona-se e dimensiona-se um pavimento em função do tráfego e das condições ambientais, além das questões de economia e disponibilidade dos recursos naturais, sempre presentes.

2.2.1. TIPOS DE PAVIMENTOS

Os pavimentos podem ter a sua estrutura classificada em dois tipos: Pavimentos flexíveis e pavimentos rígidos. Pavimentos flexíveis são compostos por diversas camadas e revestidos com materiais betuminosos ou asfálticos, os mesmos absorvem as tensões aplicadas na superfície e as transmitem para as camadas inferiores. Quando os pavimentos são sujeitos a certas deformações não chegam ao rompimento.

O DNIT (2003) define pavimento flexível como o pavimento que consiste em uma camada de rolamento asfáltico e de base, constituída de uma ou mais camadas, que se apoiam sobre o leito da estrada sendo que a camada de rolamento pode adaptar-se à deformação da base quando solicitada.

Pavimentos rígidos são os que sofrem pouca deformação ao longo do tempo, mas quando sujeito a tal deformação logo se rompem, os mesmos são constituídos de concreto de cimento. Os esforços aplicados na superfície são distribuídos de forma uniforme pelo revestimento, portanto a tensão que consegue atingir as camadas inferiores do pavimento é mínima.

O DNIT (2004) define pavimento rígido como o revestimento que tem elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado.

2.2.2. CAMADAS DOS PAVIMENTOS

Os pavimentos são constituídos por diversas camadas, que são feitas a partir da compressão de diferentes materiais, as mesmas tem a função de diluir as tensões que os automóveis aplicam na superfície, visando que as camadas no interior recebam uma tensão menor. Silva (2008) define pavimento como uma estrutura de múltiplas camadas

com espessuras finitas, onde tradicionalmente a qualidade (resistência) do material de construção decresce com a profundidade.

Um pavimento tipo (flexível) é constituído de camadas de revestimento, base, sub- base, reforço de subleito e subleito. O revestimento é a camada que fica na superfície do pavimento, a mesma entra em contato direto com o rolamento dos veículos e é construída para receber cargas sem sofrer deformações plásticas e elásticas, para oferecer mais conforto, comodidade e segurança aos usuários. As mesmas são constituídas de um ligante betuminoso que é uma mistura de hidrocarbonetos e por agregados que são as pedras britadas, cascalhos entre outros.

A base, subjacente ao revestimento, é responsável por diluir e distribuir as tensões causadas pelo rolamento do automóvel para as camadas inferiores. Devido a isto é necessário que a base seja sempre bem planejada e constituída por materiais de boa qualidade. Segundo Silva (2008), os materiais que podem ser utilizados como base são brita graduada simples, concreto compactado a rolo, brita graduada tratada com cimento, macadames hidráulico e seco, solo-cal, solo-cimento, e solo-brita.

A sub- base é uma camada que serve para complementar a base. Quando a camada de base é muito grossa é necessário dividi- lá em duas, dando origem assim á sub-base, o que se torna mais viável economicamente. No reforço de subleito a camada de solo tem uma qualidade melhor que o subleito e serve como reforço para o subleito minimizando os esforços causados pelos veículos. Conforme Senço (2007), o reforço de subleito é uma camada suplementar do subleito ou uma camada complementar da sub-base. Por último, o subleito é o terreno de fundação do pavimento, o mesmo recebe uma parcela dos esforços que foram causados sobre a superfície do pavimento e os transmitem para o solo.

2.3. DANOS AOS PAVIMENTOS

Com o passar do tempo é inevitável que o pavimento passe por um processo de degradação. Esses defeitos na superfície podem ser ocasionados por inúmeros motivos, um deles é o fluxo de veículos comerciais, ônibus e caminhões, que influenciam com intensidade nessa deterioração devido à tensão de tração que fazem na superfície do pavimento ser bem elevada. Outros fatores que também influenciam nesse processo são as cargas dos veículos leves, produtos químicos e as atuações climáticas, como a umidade.

Em virtude dos danos causados na superfície dos pavimentos, os veículos também sofrem com a influência de tais defeitos, o que gera prejuízos econômicos para os usuários, como a necessidade de gasto com manutenção dos automóveis, com combustível, a necessidade de uma troca mais frequente dos pneus do carro, devido aos desgastes que os mesmos sofrem ocasionado pelo longo tempo de viagem. Conforme BERNUCCI (2006) , do ponto de vista do usuário, o estado da superfície do pavimento é o mais importante, pois os defeitos ou irregularidades nessa superfície são percebidos, uma vez que afetam o seu conforto e segurança.

O manual do DNIT (2006) avalia o desempenho do pavimento com base em duas categorias, que são: O desempenho funcional e o desempenho estrutural. O desempenho funcional compromete o conforto e a segurança dos usuários, incluem as condições da superfície e conforto do rolamento, o seu estudo visa identificar se o mesmo está em condições satisfatórias de utilização. Balbo (2007), afirma que, o desempenho funcional está nitidamente associado às irregularidades presentes na superfície dos pavimentos. Os

defeitos de classe funcional estão relacionados às condições de segurança e trafegabilidade do pavimento em termos de rolamento (DNIT, 2006).

Desempenho estrutural é decorrente da repetição das cargas o que causam deformações elásticas e plásticas. O estudo dessas deformações tem como meta avaliar a situação de conservação dos pavimentos. Essas falhas e defeitos foram classificados segundo as normas do DNIT 005/2003- TER- Defeitos nos pavimentos asfálticos- Terminologia.

2.3.1. TRINCAS

As trincas são oriundas das constantes ações climáticas e dos esforços causados pelos veículos, as mesmas são apresentadas na superfície do pavimento. Podem ser classificadas como: trincamento por fadiga, transversal, longitudinal e em blocos.

O trincamento por fadiga corre em virtude da diminuição da resistência do revestimento, devido ao uso contínuo e esforços repetidos. Essas trincas também são conhecidas como "couro de jacaré". As trincas transversais podem ser classificadas como curtas e longas quando apresentam comprimento inferior ou superior a 1 m, respectivamente. Para Nunes (2002), elas representam o conjunto de trincas perpendiculares à linha central do pavimento. Podendo ser causadas pela contração da capa asfáltica, devido a baixas temperaturas, endurecimento do asfalto ou pela propagação das trincas abaixo do revestimento da estrada.

São trincas que se apresentam paralelas às linhas do pavimento, chamadas longitudinais, podem ocorrer devido a falhas de execução, envelhecimento do ligante asfáltico. Essas trincas causam problemas de drenagem e facilita a infiltração de água no pavimento que faz com que ocorra a diminuição de resistência da camada de base. As trincas em blocos são caracterizadas por sua regularidade geométrica, Para NUNES (2002), são o conjunto de trincas que divide a superfície do asfalto em peças retangulares com aproximadamente 0,1 até 10 de área, causando a aparência de blocos. Estas expressam que o asfalto sofreu um endurecimento deixando-o menos flexível.

2.3.2. AFUNDAMENTO

Os afundamentos ocorrem devido às deformações permanentes, os mesmos surgem da redução de volume ou do deslocamento entre as camadas. NUNES (2002) descreve afundamento como uma concavidade no pavimento, que é provocada por defeitos na construção ou no recalque do terreno de fundação ou de aterro. Esta patologia é classificada como afundamento de consolidação e plástico.

2.3.3. EXSUDAÇÃO

Este defeito se dá devido ao excesso do uso do material ligante na massa asfáltica, o que causa manchas escuras na superfície do pavimento, facilitando assim o risco de derrapagem dos veículos. O DNIT (2003) cita que a exsudação causada pela migração do material ligante através do revestimento para a superfície, onde ocorre a sua concentração.

2.3.4. CORRUGAÇÃO OU ONSULAÇÃO

É identificada pelo formato de pequenas ondas transversais na superfície do pavimento, essas ondulações ocorrem devido ao deslocamento da massa asfáltica. As ondulações se diferem das corrugações devido ao seu comprimento de onda, que é bem maior.

2.3.5. PANELAS

Devido à intensa solicitação do tráfego nos pavimentos, ocorre a remoção de plaquetas do revestimento asfáltico, conhecidos como panelas ou buracos, as mesmas causam um forte impacto sobre o tráfego, ocasionando diversos transtornos para os motoristas, como desconforto, desgaste veicular e riscos de acidentes. NUNES (2002) define panelas como cavidades de tamanhos variados, no revestimento do pavimento.

2.3.6. REMENDOS

O Remendo Superficial é uma medida paliativa para deixar o revestimento asfáltico em nível adequado de serviço, o mesmo é efetuado quando se faz notável a presença de panelas e buracos. Bernucci et. Al (2006), diz que remendo é um tipo de defeito apesar de estar relacionado a uma conservação da superfície e caracteriza-se pelo preenchimento de panelas ou de qualquer outro orifício ou depressão com massa asfáltica.

2.4. METODOLOGIA PAVER

A metodologia PAVER, desenvolvida pela U.S Army Corps of Engineers, (USACE), é um sistema de gerência de pavimentos - SGP que foi originado para minimizar os custos com manutenção. Para a utilização desse método sempre deve ser levado em conta os recursos disponíveis, o tamanho da malha viária que pretende fazer o estudo e pessoas adequadas para realizar tais analises.

O método PAVER, deve ser aplicado da seguinte forma: Deve ser feita a divisão de trechos da rodovia e fazer em cada trecho o estudo da sua condição superficial, a fim de identificar os defeitos existentes e o seu grau de severidade. Esses resultados são registrados no PCI, Índice das Condições dos Pavimentos, os dados auxiliam a identificar e priorizar onde são os locais que tem necessidade do processo de manutenção e reparos.

2.4.1. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PAVER

Segundo Sucupira (2006), a metodologia de análise dos pavimentos PAVER, de acordo com *USACE* (1982), consiste em um sistema de gerência desenvolvido inicialmente para ser aplicado em instalações militares com o objetivo de reduzir os custos de manutenção das mesmas através da priorização da intervenção oportuna associada à manutenção racional e ao uso dos recursos limitados.

Essa técnica pode ser aplicada em diversas áreas onde ocorre a frequente transição de veículos, como rodovias, avenidas, ruas, pistas de aeroportos e estacionamentos com o objetivo de fazer a análise do estado dos pavimentos. Os trechos devem sofrer intervenções com o propósito de sempre apresentar melhorias, conforto e segurança para os seus usuários. A metodologia também permite o acompanhamento dos desgastes dos pavimentos ao longo dos anos.

2.4.2. MÉTODO DE DIVISÃO DA MALHA VIÁRIA

Devido às malhas viárias terem uma extensão muito grande é necessário dividi-las em trechos e em cada trecho dessas malhas é feito o estudo, identificando se é necessário fazer um trabalho de manutenção e reparo. USACE (1982) subdivide a malha viária em três categorias que são classificadas de forma decrescente em relação a extensão, que são os ramos, seções e unidades de amostra (UA).

2.4.2.1. RAMOS

Os ramos são as ruas, avenidas, estacionamentos os mesmos são classificados por códigos como mostra a tabela a seguir:

Tabela 1: Código dos ramos

TIPOS DE RAMOS	CÓDIGO DO RAMO
Avenidas e ruas	1
Estacionamentos	E
Armazéns	A
Outros (ex: Pátios)	O

Fonte :Sucupira (2006).

Para identificar o ramo no sistema PAVER usa-se um código que é obtido pela primeira letra do tipo de ramo como descreve a tabela 1 e sendo seguido pelo nome do edifício mais próximo do local onde se inicia o ramo.

2.4.2.2. SEÇÕES

As seções são criadas quando dividimos os Ramos em tamanhos menores. Segundo USACE (1982) para separar as seções de um ramo é preciso:

- Composição estrutural: Os materiais utilizados devem ser os mesmos na seção, a espessura das camadas dos pavimentos deve ser constante, e as mesmas terem o sido feitas na mesma época, caso alguns desses critérios não sejam obedecidos deve-se criar uma nova seção a ser analisada.
- O tráfego no local da seção: deve possuir aproximadamente o mesmo número de veículos e intensidade de carga em toda a área da seção.
- Área de teste: Qualquer trecho que tenha sido testado um novo material é necessário criar uma nova seção a ser estudada.
- A condição do pavimento: deve ser similar em toda a área da seção.
- Drenagem no local: a existência de calhas de drenagem em alguns trechos da via é um critério para a separação de seções neste ponto.

2.4.2.3. UNIDADES DE AMOSTRA (UA)

As Unidades de Amostra são o menor elemento de divisão da malha viária, sendo utilizada para melhor verificar e estudar os defeitos nos pavimentos. Nos pavimentos de revestimento asfáltico, cada Unidade de Amostra (UA) deve possuir uma área aproximada de 225, com uma área mínima de 90.

2.4.3. A FORMA DE AVALIAÇÃO DOS PAVIMENTOS

2.4.3.1. ÍNDICE DE CONDIÇÕES DOS PAVIMENTOS (PCI)

A pesquisa das condições da superfície dos pavimentos é essencial para determinar a necessidade de manutenção e reparos. Segundo Usace (1982) para fazer auxiliar na priorização de manutenção é essencial à obtenção do índice de condições do pavimento (PCI), O mesmo é proposto para medir a condição da superfície do pavimento. O PCI varia de 0 a 100. Quanto maior for o valor do PCI melhor será a condição do pavimento, como mostra a Tabela 2:

Tabela 2: Taxa Variação do PCI e condições do Pavimento

ESCALA DO PCI	CONDIÇÃO DO PAVIMENTO
85-100	Excelente
70-85	Muito Bom
55-70	Bom
40-55	Razoável
25-40	Pobre
10-25	Muito Pobre
0-10	Péssimo

Fonte: Sucupira (2006).

2.4.4. FORMA DE REGISTRO DOS DADOS

2.4.4.1. INSPEÇÃO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Primeiramente deve ser feita uma inspeção visual do pavimento analisando as patologias e seu nível de complicação, o PCI para analisar esses problemas é utilizado um odômetro de mão e uma régua. É necessário separar as Unidades de Amostra (UA), cada uma deve ter aproximadamente área de 225m^2. Porém, nem todas as Unidades de Amostra serão analisadas.

As Unidades de Amostra devem ser escolhidas de forma aleatória onde número de intervalos é dado pela equação a seguir:

$$i = \frac{N}{n}$$

Onde:

i: Intervalo fixo de inspeção UAs

N: Número total de UAs da inspeção

n: Número mínimo de UAs a serem pesquisados

Para um exemplo com N (número total) de 36 UAs e com um número mínimo (n) de 11 a serem pesquisados, teremos:

$$\text{i}=\frac{36}{11}=3{,}27\ UA$$

Portanto consideramos o intervalo de 3UA. E, se o nosso número de Unidades de Amostras a serem pesquisadas é de 11UA, a primeira unidade de amostra é escolhida de forma aleatória as demais devem ter intervalos de 3UA. Caso a primeira UA seja a de valor um (1), serão: 01, 04, 07, 10, 13, 16, 19, 22, 25, 28, 31, 34, ao todo 12 UA, Valor que é superior a (n=11). Os defeitos encontrados em cada UA devem ser preenchidos em planilhas separadas, onde cada UA deve apresentar a sua própria. Os defeitos devem em preenchidos, conforme apresentado em Sucupira (2006).

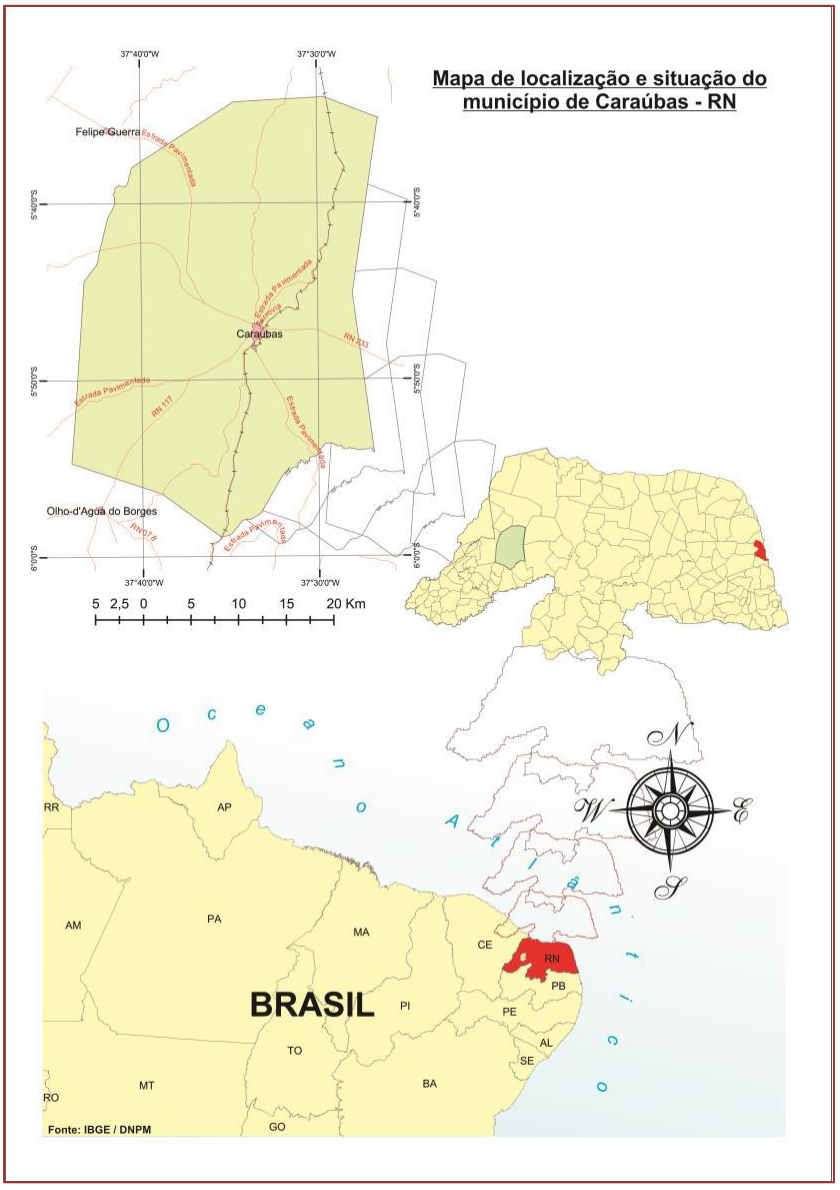
3. METODOLOGIA

3.1. ESCOLHA DA ÁREA DE ESTUDO

O trecho de medição para aplicação da metodologia PAVER de avaliação está localizado na rodovia RN 233, em um total de 1.130m de extensão, com início na rotatória da entrada do município de Caraúbas, estado do Rio Grande do Norte, localizada na coordenada 5° 46’ 83’’ Sul e 37° 33’ 27’’ Oeste, finalizando na coordenada 5°45’ 42’’ Sul e 37° 34’ 93’’ Oeste.

O trecho escolhido é solicitado diariamente por carros pesados que fazem transporte de mercadorias, ônibus, carros leves, motos, dentre outros veículos. Além disto, é o único caminho de acesso dos estudantes do município até a universidade. Esse intenso tráfego faz com que ocorra um desgaste mais rápido do pavimento, sendo necessárias manutenções periódicas para conserva-lo com o intuito de preservar a segurança e conforto dos usuários.

Figura 1 - Localização do município de Caraúbas/RN



Fonte: Adaptado por Farias, 2010.

3.2. METODOLOGIA APLICADA NA COLETA DOS DADOS

O trecho da seção pesquisada não possui largura constante em toda sua extensão e por este motivo foi realizado três medições em pontos diferentes obtendo-se uma média aritmética. Este procedimento resultou um valor de 6,275m, e, como a metodologia PAVER recomenda a utilização de números inteiros para evitar a perda de tempo com números fracionários, foi considerado o valor de 6,3m de largura.

Segundo *USACE* (1982), a área média de avaliação para uma unidade de amostra (UA) é de 225m^2. Foram utilizadas unidades de amostras de 37m de extensão, obtendo-se uma área equivalente de 233,1m^2 (6,3m x 37m), sendo considerado 233m^2. Portanto, foi calculado 30 UA e 1 UA com 6,3m x 20m, totalizando 31 considerando uma área total de 7119m^2.

Para o número de unidades de amostra encontradas, com uma taxa de variação de PCI de 25 pontos (para pavimentos asfálticos), tem-se pelo gráfico da figura 3.15 que nesse trecho o número mínimo de UA a ser analisados são onze (11), analisadas de forma aleatória onde o número de intervalos entre essas UAs foi encontrado pela seguinte relação:

$$i = \frac{31}{10} = 3{,}1$$

Tem-se que o intervalo deve ser a cada 3 UA, sendo escolhido como a unidade de amostra inicial a número 1. Ao fazer analise visual das Unidades de Amostra, constatou- se que a de número 11 apresentava diversos defeitos e não estava contemplada dentre as onze aleatórias, porém foi incluída na análise totalizando doze (12) UA. Os principais defeitos e avaliados foram: Trincamento Longitudinal, Trincamento por Fadiga, Afundamento Local, Buracos ou Panelas e Remendos.

3.3. A FORMA DE ANÁLISE DOS DADOS

A Figura 2, mostra a forma de medição dos defeitos analisados por *USACE* (1982) para os pavimentos asfálticos e de concreto segundo APS; Balbo e Severi (1998).

Figura 2 - Forma de Medição dos Defeitos dos Pavimentos

Defeito	Forma de Medição	Defeito	Forma de Medição
Couro de Jacaré	Área	Remendos	Área
Exsudação	Área	Agregado Polido	Área
Fissuras em Blocos	Área	Panelas	unidade
Elevações e Recalques	metro linear	Cruzamento Ferroviário	Área
Corrugação	Área	Afundamento de Trilha de Roda	Área
Afundamento Localizado	Área	Escorregamento de Massa	Área
Fissuras de Borda	metro linear	Fissuras devido ao Escorregamento de Massa	Área
Fissuras por Reflexão de Juntas	metro linear		
Desnível Pavimento/Acostamento	metro linear	Inchamento	Área
Fissuras Longitudinal e Transversal	metro linear	Desgaste	Área

3.4. CÁLCULO DE VALORES DEDUZIDOS E PCI'S

Segundo a metodologia citada há a necessidade da obtenção de parâmetros que dão suporte na aquisição do Índice das Condições dos Pavimentos – PCI e, consequentemente, a indicação da avaliação do pavimento analisado. Cada tipo de defeito e severidade tem o seu valor deduzido correspondente, e estes foram obtidos nas curvas dos ábacos.

A partir disto, foram calculadas as densidades em função de cada tipo de defeitos inventariados nas UA's analisadas, no tocante ao procedimento de obtenção da severidade da patologia, ou seja, defeitos medidos em área, em comprimento e por unidade. As equações utilizadas para os determinados cálculos, respectivamente, foram:

$$\text{Densidade} = \frac{Densidade\ do\ defeito\ (m)^2}{Área\ da\ UA\ (m)^2} * 100$$

$$\text{Densidade} = \frac{Comprimento\ do\ defeito(m)}{Área\ da\ UA(m)} * 100$$

$$\text{Densidade} = \frac{Número\ de\ panelas}{Área\ da\ UA(m)^2} * 100$$

Após alcançar todos os valores deduzidos unitários foi feito o somatório dos mesmos, tendo assim o Valor Deduzido Total – VDT. Em seguida foi feito a correção do Valor Deduzido Total utilizando as curvas de correção de Valor Deduzido Total para os pavimentos asfálticos, indicados pela metodologia aplicada. Tal procedimento foi obtido os Valores Deduzidos Corrigidos – VDC.

Para o cálculo tanto dos PCI's individuais, quanto da média da seção, valor este que indicará a real condição do pavimento estudado, foi utilizado às equações a seguir:

- Valor do PCI para unidade de amostra: $PCI_{UA} = 100 - VDC$
- Valor do PCI da seção:

$$PCIs = \frac{PCIr(A_S - \sum_{1=I}^{A} A_{ai}) + PCIa * \sum_{i=1}^{A} A_{ai}}{\sum_{i=1}^{A} A_{ai}}$$

Onde:

$PCIr$: Média ponderada da área x PCI das UA's aleatórias

$PCIa$: Média ponderada da área x PCI das UA's adicionadas

A_{ai} : Área das UAs adicionais.

A_S: Área total da seção.

Com o valor do PCI da seção obtido foi determinada a classificação (condição) real do trecho pesquisado a partir da tabela indicada na metodologia (tabela 3.2). Através destes resultados foi possível tomar decisões sobre o aspecto da necessidade de intervenções mais rápida e que necessita de prioridade, na execução de reparos nas seções com PCI's mais graves, ou seja, nas de menor valor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela 5.1 mostra os defeitos encontrados nas doze (12) UA analisadas, com suas severidades, quantidades e unidades de medição após inspeção realizada.

Tabela 3: Taxa Variação do PCI e condições do Pavimento

Defeitos	Severidade	UA 01	UA 04	UA 07	UA 10	UA 11	UA 13	UA 16	UA 19	UA 22	UA 25	UA 28	UA 31
Trinca Transversal (m)	Baixa	-	1,78	-	-	-	2,30	-	1,4	-	-	-	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trinca Longitudinal (m)	Baixa	2,15	7,1	2,1	3,62	-	5,3	2,0	1,6	3,30	6,6	2,55	1,60
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Trinca por Fadiga (m)	Baixa	-	4,5	-	14,8	5,7	14,36	0,48	-	4,8	0,7	-	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Afundamento Local (m^2)	Baixa	-	-	-	-	-	-	0.26	-	-	-	-	0,27
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Afundamento por Trilha de Roda (m^2)	Baixa	3,0	4,0	5,8	-	-	-	-	2,35	5,25	2,64	6,38	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Buracos (unidades)	Baixa	-	-	-	-	2	-	-	1	1	-	1	1
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1
	Alta	-	-	-	1	1	-	-	-	-	-	-	-
Remendos (m^2)	Baixa	-	-	3,87	2,69	0,52	-	-	-	0,93	-	1,70	-
	Média	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Alta	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Na seção estudada foram catalogados os defeitos citados. Dentre eles 10 trincas transversais, 27 trincas longitudinais, 26 trincas por fadiga, 02 afundamentos, 24 afundamentos de trilha de roda, 10 buracos nas e 09 remendos. As Figuras 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 mostra tais defeitos e as respetivas unidade de amostra (UA) , além de sua extensão.

Figura 2- Trincas Transversais na seção estudada

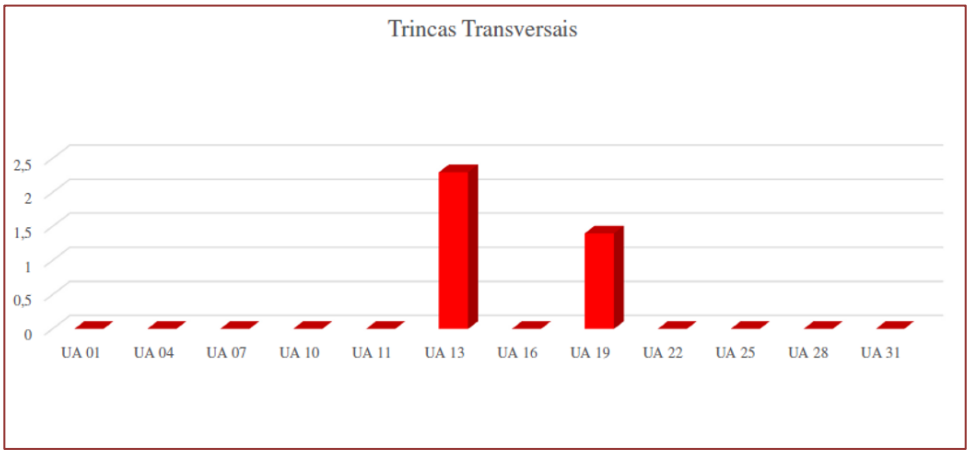


Figura 3 - Trincas Longitudinais na Seção estudada

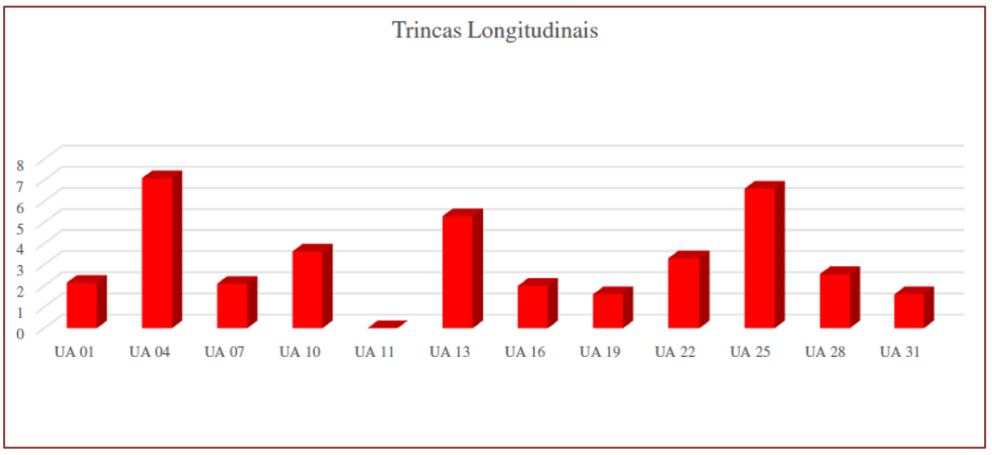


Figura 13- Trinca por Fadiga na seção estudada

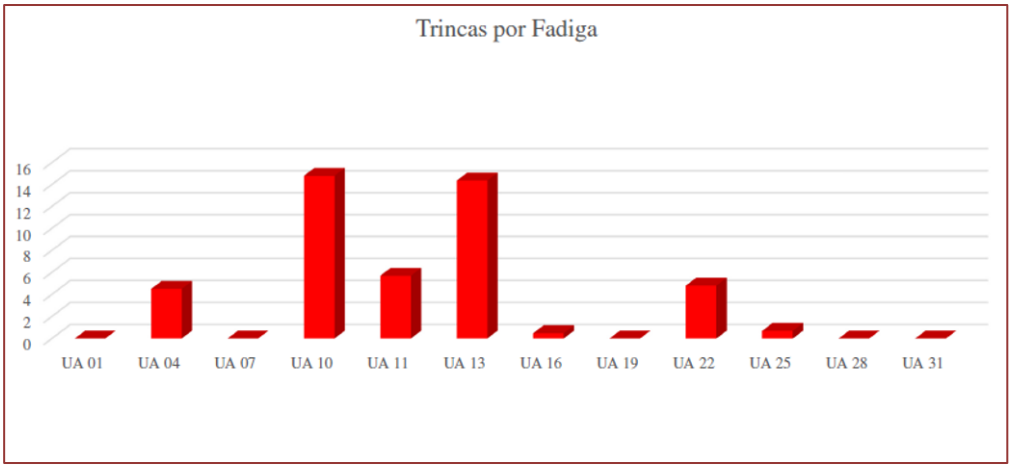


Figura 5 - Afundamentos localizados na seção estudada

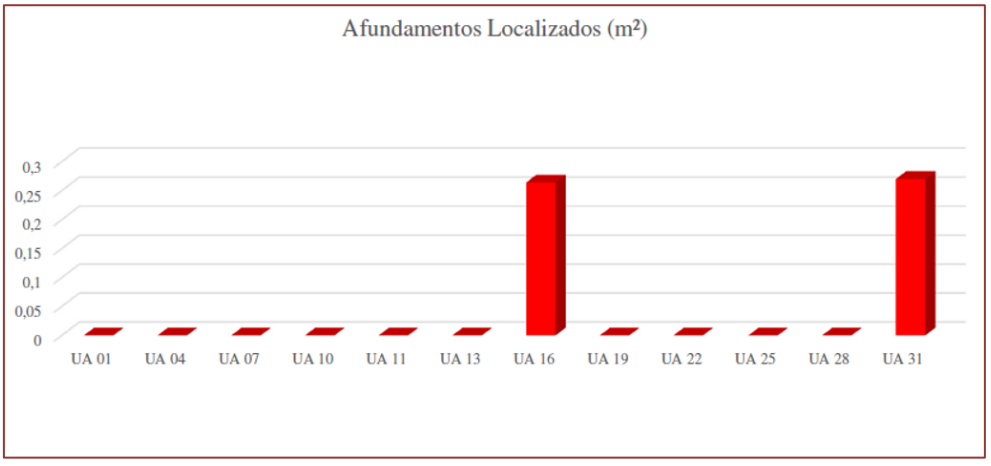


Figura 6 - Afundamentos por trilha de Roda na seção estudada

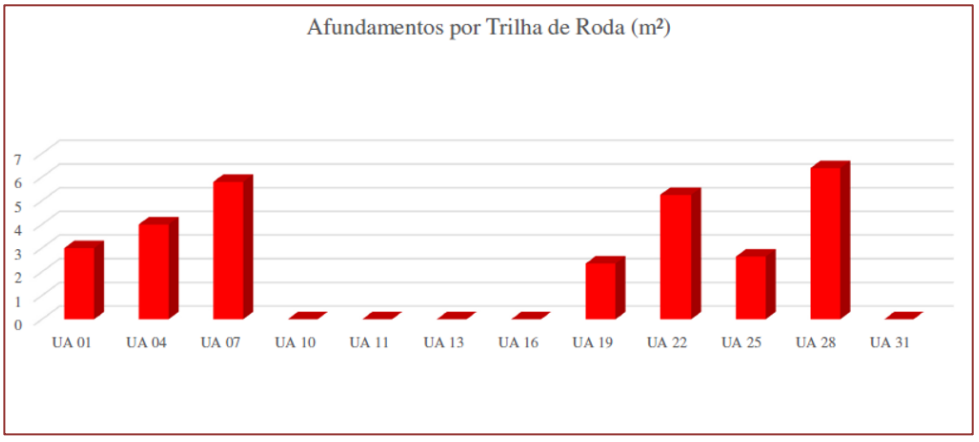


Figura 7 - Buracos ou Panelas na seção estudada

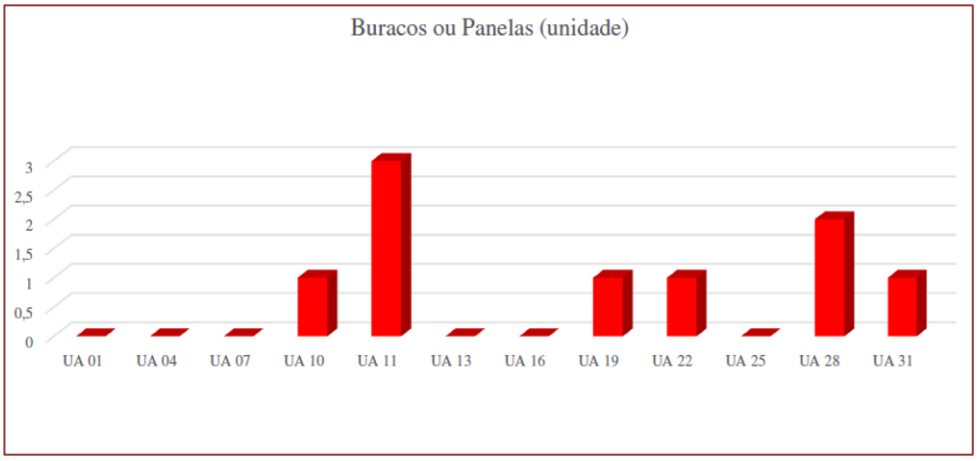
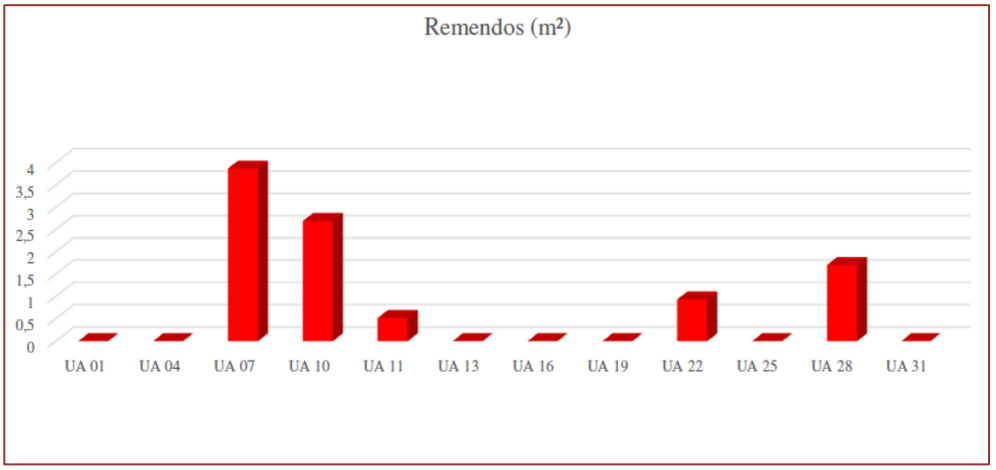


Figura 8 - Remendos na seção estudada



Os PCI's individuais de cada unidade de amostra aleatórias e a adicional analisadas, são apresentados nas tabelas 4 a 15.

Tabela 4 : PCI da UA 01 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 01		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	2,15 m	0,92	02
Afundamento por Trilha de Roda (B)	3,0 m²	1,92	08
q= 1	Valor Deduzido Total (VDT)		10
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			10
PCI (UA 01)			90
CLASSIFICAÇÃO			EXCELENTE

Tabela 5: PCI da UA 04 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 04		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Transversal (B)	1,78 m	0,76	01
Trinca Longitudinal (B)	7,1m	3,04	08
Trinca por Fadiga (B)	4,5 m	1,93	16
Afundamento por Trilha de Roda (B)	4,0 m²	1,71	10
q=3	Valor Deduzido Total (VDT)		35
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			20
PCI (UA 04)			80
CLASSIFICAÇÃO			MUITO BOM

Tabela 6 : PCI da UA 07 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 07		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	2,1 m	0,90	02
Afundamento por Trilha de Roda (B)	5,8 m²	2,48	16
Remendo (B)	3,87 m²	1,66	04
q=1	Valor Deduzido Total (VDT)		22
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			22
PCI (UA 07)			78
CLASSIFICAÇÃO			MUITO BOM

Tabela 7 : PCI da UA 10 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 10		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	3,62 m	1,55	03
Trinca por Fadiga (B)	14,8 m	6,35	26
Buracos (A)	1 unidade	0,43	88
Remendo (B)	2,69 m²	1,15	02
q=2	Valor Deduzido Total (VDT)		119
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			81
PCI (UA 10)			19
CLASSIFICAÇÃO			MUITO POBRE

Tabela 8 : PCI da UA 11 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 11		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca por Fadiga (B)	5,7 m	2,44	18
Buracos (B)	2 Unidades	0,86	55
Buracos (A)	1 Unidade	0,43	88
Remendo (B)	0,52 m²	1,15	01
q=3	Valor Deduzido Total (VDT)		162
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			91
PCI (UA 11)			9
CLASSIFICAÇÃO			PÉSSIMO

Tabela 9 : PCI da UA 13 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 13		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Transversal (B)	2,30 m	0,98	02
Trinca Longitudinal (B)	5,3 m	2,27	07
Trinca por Fadiga (B)	14,36 m	1,17	26
q=2	Valor Deduzido Total (VDT)		35
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			24
PCI (UA 13)			76
CLASSIFICAÇÃO			MUITO BOM

Tabela 10 : PCI da UA 16 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 16		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	2 m	0,85	02
Trinca por Fadiga (B)	0,48 m	0,20	06
Afundamento Localizado (B)	0,26 m²	0,11	04
q=1	Valor Deduzido Total (VDT)		12
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			12
PCI (UA 16)			88
CLASSIFICAÇÃO			EXCELENTE

Tabela 11 : PCI da UA 19 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 19		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Transversal (B)	1,4 m	0,6	01
Trinca Longitudinal (B)	1,6 m	0,68	01
Afundamento por Trilha de Roda (B)	2,35 m²	1,01	07
Buracos (B)	1 Unidade	0,43	42
q=2	Valor Deduzido Total (VDT)		51
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			32
PCI (UA 19)			68
CLASSIFICAÇÃO			BOM

Tabela 12 : PCI da UA 22 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 22		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	3,30 m	1,42	03
Trinca por Fadiga (B)	4,8 m	2,06	16
Afundamento por Trilha de Roda (B)	5,25 m²	2,25	12
Buracos (B)	1 Unidade	0,43	42
Remendos (B)	0,93 m²	0,40	01
q=3	Valor Deduzido Total (VDT)		74
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			52
PCI (UA 22)			48
CLASSIFICAÇÃO			RAZOÁVEL

Tabela 13 : PCI da UA 25 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 25		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	6,6 m	2,83	06
Trinca por Fadiga (B)	0,7 m	0,30	04
Afundamento por Trilha de Roda (B)	2,64 m²	1,13	08
q=2	Valor Deduzido Total (VDT)		18
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			12
PCI (UA 25)			88
CLASSIFICAÇÃO			EXCELENTE

Tabela 14 : PCI da UA 28 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 28		ÁREA DA UA :	231 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	2,55 m	1,09	02
Afundamento por Trilha de Roda (B)	6,38 m²	2,74	16
Buracos (B)	1 Unidade	0,43	42
Buracos (M)	1 Unidade	0,43	66
Remendos (B)	1,705 m²	0,73	02
q=3	Valor Deduzido Total (VDT)		128
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			85
PCI (UA 28)			15
CLASSIFICAÇÃO			MUITO POBRE

Tabela 15 : PCI da UA 31 da seção estudada

CÁLCULO DO PCI			
UA 31		ÁREA DA UA :	126 m²
Defeitos	*Valor*	*Densidade*	*Valor Deduzido*
Trinca Longitudinal (B)	1,60 m	1,27	02
Afundamento Localizado (B)	0,27 m²	0,21	04
Buraco (B)	1 Unidade	0,80	54
Buraco(M)	1 Unidade	0,80	88
q= 2	Valor Deduzido Total (VDT)		148
Valor Deduzido Corrigido (VDC)			94
PCI (UA 31)			6
CLASSIFICAÇÃO			PÉSSIMO

A tabela 16 exibe o cálculo do PCI geral para a seção, mostrando também a condição pós avaliação, além das prioridades de intervenções a serem realizadas nas UA's analisadas. O cálculo para o PCI geral foi obtido considerando o acréscimo de uma unidade de amostra.

Tabela 16: PCI da Seção

CÁLCULO DO PCI			
SEÇÃO	PCI (SEÇÃO)	**51,08**	
Condição da Seção		**RAZÓAVEL**	
Unidades de Amostra	PCI (UA)	Condição (UA)	Prioridade de Intervenção nas UA's
UA 01	90	EXCELENTE	12º
UA 04	80	MUITO BOM	9º
UA 07	78	MUITO BOM	8º
UA 10	19	MUITO POBRE	4º
UA 11	9	PÉSSIMO	2º
UA 13	76	MUITO BOM	7º
UA 16	88	EXCELENTE	11º
UA 19	68	BOM	6º
UA 22	48	RAZOÁVEL	5º
UA 25	88	EXCELENTE	10º
UA 28	15	MUITO POBRE	3º
UA 31	6	PÉSSIMO	1º

USACE (1982) determina que o cálculo do PCI seja feito para seções, como no trecho estudado só foi considerada uma seção, utilizou-se a priorização de intervenção para as unidades de amostra. Essa priorização auxilia na tomada de decisões na hora de escolher os trechos que devem passar por manutenção. A unidade de amostra que apresentar o PCI mais baixo, ou seja, que apresentam um pior estado de conservação em sua superfície, deve ser a primeira a passar por um processo de manutenção e reparos.

5. CONCLUSÕES

Como observado nos resultados obtidos, às unidades de amostra que apresentaram buracos ou panelas na sua superfície, tiveram uma queda expressiva no valor do PCI, o que interfere de forma significativa a classificação de sua condição, como revelado nas UA's 10 e 28 classificadas como Muito Pobre, UA 11 (unidade acrescentada devido as sua condição de uso comprometido) e 31 avaliadas como péssimo.

As UA's 01, 04, 07, 13, 16, 25 apresentaram classificação entre Excelente e Muito Bom, devido os defeitos mais comuns nessas unidades serem dos tipos trincas de baixa severidade, afundamentos e remendos o que não gera tanto impacto na determinação do PCI.

No tocante a necessidade de priorização de intervenções de manutenção, destaca-se as UA's 31 e 11 que foram avaliadas com condição Péssimas para utilização. Por isto, estas unidades devem receber investimentos em manutenção e recuperação antes das demais.

A condição da seção estudada foi classificada como "Razoável" com o valor do PCI igual a 51,08, confirmando as análises realizadas por meio de observações que indicam o deterioramento do pavimento, comprometendo a segurança e o conforto dos usuários, além da clara falta de serviços de manutenção pelos órgãos responsáveis. Vale salientar que análises acerca das condições dos acostamentos não foram contempladas, aspecto importante numa diagnóstico global do pavimento.

É notável a eficiência da metodologia paver para a avaliação dos defeitos na superfície do pavimento, pois a utilização desta auxiliou nas possíveis escolhas que serão consideradas como prioridades de intervenção, caso o trecho analisado venha a ser contemplado com o programa de manutenção, gerando o melhor aproveitamento dos recursos com essa priorização.

REFERÊNCIAS

[1] APS, M.; J. T. BALBO e A. A. SEVERI. **Avaliação Superficial de Pavimentos Asfálticos em Vias Urbanas Utilizando o Método do PCI**, 31a Reunião Anual de Pavimentação, São Paulo, SP, 1998.

[2] BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: matérias, projeto e restauração**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

[3] BERNUCCI, L. B., MOTTA, L. M. G., CERATTI, J. A. P., SOARES, J. B. **Pavimentação Asfáltica – Formação Básica para Engenheiros**, Rio de Janeiro, PETROBRÁS: ADEBA, 2006.

[4] Pesquisa CNT de Rodovias 2024. CNT – **Confederação Nacional de Transportes** Disponível em http://www.cnt.org.br/documento.

[5] DNIT (2004) Norma 061 – **Terminologia para Defeitos no Pavimento Rígido** – 2004. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília, DF.

[6] DNIT(2005) – **Manual de Restauração de Pavimentos asfálticos** – 2°. ed. Rio de Janeiro, 2005.

[7] DNIT (2003) Norma 005 – **Terminologia para Defeitos nos Pavimentos Flexíveis e Semi-Rígidos** – 2003. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Ministério dos Transportes, Brasília, DF, 2003.

[8] DNIT (2006) – **Manual de pavimentação. Ministério dos Transportes.** Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006.

[9] HAAS, R.; HUDSON, W.R. e ZANIEWSKI, J. (1994), **Modern Pavement Management**. Florida, Krieger Publishing Company.

[10] NUNES, T. V. L. (2002) **Novo Método para Avaliação de Pavimentos Urbanos**. Trabalho da Disciplina de Fundamentos da Infra-estrutura de Transportes, Fortaleza, CE,2002.

[11] SENÇO, W (2007). **Manual de Técnicas de Pavimentação** Vol. 2. ed. Ampl - PINI – SP, 2007.

[12] SILVA, Paulo Fernando. **Manual de Patologia e Manutenção de Pavimentos**. 2°ed. São Paulo: Pini, 2008.

[13] SUCUPIRA, Marcos Lima Leandro**. Aplicação e Adaptação da Metodologia *Paver* para Pavimentos Urbanos do Campus do Pici na Cidade de Fortaleza**. Fortaleza, 2006.

[14] USACE (1982) Technical Manual TM 5-623: **Pavement Maintenance Management** –. U.S. Army Corps of Engineers, Headquarters, Department of the Army, Washington, DC, 1982.

Capítulo 10

Avaliação do desempenho da segurança de tráfego de sistemas viários do tipo binários no município de Fortaleza-CE

Larissa Antônia Barbosa Lima
Viviane Píccolo Campos

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia de sistemas viários do tipo binários em relação ao desempenho da segurança de tráfego no município de Fortaleza. Para este fim foi realizado um estudo observacional em seis binários implantados entre 2014 e 2015 na Capital cearense. Os binários em estudo têm uma configuração de via que prioriza o transporte público para melhorar a sua fluidez. Essa solução de trânsito consiste em transformar vias paralelas e próximas, de mão dupla, em vias de sentido único, com o propósito de contribuir na melhoria do uso do espaço da via e na diminuição de conflitos entre condutores, veículos, pedestres e ciclistas e proporcionar melhorias pautadas em três eixos prioritários: foco no transporte público, no deslocamento não-motorizado e na segurança viária. Para a citada avaliação foram observados os acidentes ocorridos em três anos antes e em três anos após a implantação dos binários de referência e comparados com as ocorrências de trânsito em trechos semelhantes não binários no mesmo período da observação. Este estudo utilizou a metodologia "Antes" e "Depois", em seu modelo Simples e por Grupo de Comparação (GC), usando os números de acidentes de 2009 a 2011, considerado "antes" e de 2016 a 2018, para o período "depois", observando os seis binários implantados no município de Fortaleza-CE nos anos de 2014 e 2015 e usando vias não binárias com características semelhantes às vias binárias, como grupo de comparação. Na análise do grupo de comparação, observou-se um aumento estatisticamente significativo para acidentes com vítimas. Para os demais acidentes alvo a estimativa de redução no número de acidentes em decorrência dos efeitos de fatores globais agregado aos efeitos das implantações dos binários não se concretizou observado o desempenho dos binários nos períodos "depois", o que se pode inferir que sem considerar os efeitos globais dos fatores externos os binários teve um efeito inverso, podendo ter influenciado no aumento dos acidentes. Portanto, sugere-se estudos aprofundados para avaliar com mais profundidade a eficácia dos sistemas viários binários, inclusive visando atestar a hipótese da melhoria da fluidez impacta diretamente os vulneráveis, por ficarem mais expostos aos limites de velocidades dos condutores. Ainda como recomendação de trabalhos futuros, poderia ser citado um estudo mais aprofundado sobre a tipologia dos acidentes desse aumento observado, se envolvendo pedestres, ciclistas, motociclistas? Este tipo de estudo pode ajudar na definição de uma política para aprimorar a segurança nesse tipo de sistema.

Palavras-chave: segurança viária, sistema binário, estudos antes e depois.

1. INTRODUÇÃO

O futuro de uma cidade densamente povoada como Fortaleza depende essencialmente da excelência da mobilidade urbana que deve servir para melhorar a vida do ser humano, dando-lhe melhores condições de trafegabilidade e segurança, independentemente do seu meio de transporte.

O conceito de mobilidade urbana é muito abrangente e engloba também práticas que visam garantir segurança, não somente viária, como também à proteção da vida dos transeuntes, dos ciclistas e dos ocupantes dos veículos. Dentro deste conceito, tem sido ampliada a implantação de sistemas viários binários.

O Sistema viário Binário transforma uma via em sentido de operação em mão única de modo que duas vias passem a operar com sentidos de direção alternados. Este modelo vem sendo adotado pelas grandes capitais como solução para uma melhor distribuição do trânsito da cidade por estruturar o sistema viário local e melhor a fluidez do trânsito, uma vez que elimina conversões conflitantes e aumenta a segurança dos pedestres.

Para Fernandes et al (2016) as vias binárias de trânsito surgem como uma solução operacional. Segundo este autor, este sistema viário consiste em transformar vias paralelas e próximas, de mão dupla, em vias de sentido único, que pode vir a contribuir no melhor uso do espaço da via e na diminuição de conflitos entre veículos, pedestres e ciclistas.

Com a execução do Plano de Ações Imediatas em Transporte e Trânsito de Fortaleza (PAITT), a Prefeitura de Fortaleza vem, desde 2014, implantando soluções para a otimização da circulação e segurança viária para os pedestres e ciclistas e para beneficiar e dar mais segurança para pessoas com mobilidade reduzida. Dentre as intervenções, têm implantando sistemas viário binários com uma conotação mais ampla de intervenção. Até 2019, já foram implantados 24 Binários em Fortaleza, com intervenções complementares, tais como requalificação da iluminação pública e dos pavimentos, correção de drenagem, a implantação de prolongamentos de calçadas, faixas em diagonal, além de travessias elevadas para pedestres, dentre outras intervenções.

Alguns estudos sobre os sistemas viários do tipo binário tem se focado na avaliação de impacto da sua implantação na melhoria do trânsito, a exemplo de Fernandes et al (2016), que em sua pesquisa buscou avaliar a influência da implantação de binários como solução operacional de planejamento de trânsito no transporte público urbano e nele verificou que os sistemas binários não só aumentaram o número de pessoas transportadas por hora pela via, como também melhorou a mobilidade das ruas em questão.

Já Madeira (2014) divulgou estudos da Prefeitura de Fortaleza que atestam que as medições realizadas no binário da Avenida Dom Luís, em julho de 2014, excluindo o trecho no entorno da Praça Portugal, mostraram que nos horários de engarrafamento o tempo de permanência no trânsito, foi reduzido em cerca de 46%.

Osório (2017), em seu estudo de implantação de Sistema Binário nas ruas de acesso à praia de Ponta Negra – RN, averiguou que essa solução para os problemas de trânsito no local escopo do estudo foi bastante viável, uma vez que dispensou grandes obras estruturais, além dos diversos benefícios proporcionados ao transito da região, como: melhorias no fluxo, na acessibilidade e na segurança dos usuários.

Teixeira *et al* (2015) estudou o impacto sobre o tráfego urbano devido implantação de sistema binário de avenidas na cidade de Fortaleza/CE, e concluiu que de um modo geral,

foi constatado que a implementação do binário foi satisfatória para o tráfego na região onde a solução foi implantada, tendo sido observado um ganho na velocidade média na Avenida Dom Luís e em quase todos os horários picos da Avenida Santos Dumont, além da redução no tempos de viagem nessas vias.

Nota-se que, os resultados destes estudos, apontam para a melhoria da fluidez do trânsito, redução de engarrafamentos e do tempo de permanência no trânsito, aumento da capacidade das vias, menor tempo de viagem, melhoria no transporte público, aumento da velocidade média dos veículos e um maior espaço para ultrapassagens nas vias.

No entanto, não se tem localizado pesquisas sobre a eficácia dos binários quanto a previsibilidade para a diminuição de conflitos entre condutores, veículos, pedestres e ciclistas. Os trabalhos de avaliação desses sistemas binários por terem em sua maioria foco na fluidez deixa lacuna em relação à avaliação da segurança no trânsito no sentido de verificar se os binários de fato reduzem a quantidade e a severidade dos acidentes.

Pelos motivos expostos, este trabalho pretende contribuir com as discussões sobre a eficácia de sistemas viários do tipo binários em relação ao desempenho da segurança de tráfego, a partir de estudo de caso no município de Fortaleza.

Para o desenvolvimento deste estudo e um melhor entendimento pelo leitor, este trabalho está formatado em três partes, sendo a primeira dedicada à contextualização sobre os sistemas viários binários, a segunda trata da metodologia de pesquisa utilizada, incluindo a seleção da amostra, coleta e análise de dados e a terceira parte sobre os estudos observacionais aplicados e seus resultados. O referencial teórico permeia as partes de acordo com o tema abordado. Por fim, contempla as considerações finais e as referências bibliográficas.

2. SISTEMAS VIÁRIOS BINÁRIOS

Trânsito é o uso das vias por pessoas, veículos e animais, de forma isolada ou em grupos, de forma conduzida ou não, para fins de circulação, parada, estacionamento e operação de carga ou descarga, conforme definição do Código Brasileiro de Trânsito (1997), que preconiza ainda que condições seguras de trânsito são direito de todos e dever dos órgãos e entidades componentes do Sistema Nacional de Trânsito.

Para garantir a segurança no uso das vias as políticas públicas buscam implementar iniciativas e processo de melhorias continuadas para oferecer fluidez no trânsito e reduzir acidentes viários e gargalos críticos de trânsito. Dentre outros fatores, torna a mobilidade urbana uma das prioridades da pauta de planejamento das cidades modernas. De acordo com o Ministério das Cidades (Brasil, 2013) é um desafio implementar soluções para o tráfego de 3,5 milhões de novos veículos que, a cada ano, passam a circular pelas vias urbanas do país, além da frota existente que em 2013 eram mais de 75 milhões.

Em uma cidade que possua um planejamento de trânsito no transporte público, a implantação de binários pode ser uma solução de melhorias, podendo-se utilizar alguns modais sustentáveis para que haja um equilíbrio entre os pedestres, ciclistas e veículos (Fernandes *et al*, 2016).

O sistema viário binário é uma solução de trânsito que consiste em transformar vias paralelas e próximas, de mão dupla, em vias de sentido único, conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1 Sistemas Viários Binário e Não Binário

Fonte: Os autores, 2020.

Estes sistemas viários têm como propósito contribuir na melhoria do uso do espaço da via e na diminuição de conflitos entre condutores, veículos, pedestres e ciclistas e proporcionar melhorias pautadas em três eixos prioritários: foco no transporte público, no deslocamento não-motorizado e na segurança viária. Teixeira et al (2015), destacam os principais benefícios propostos na implantação de um Sistema Binário:

i. Aumento na capacidade das vias: a sincronização semafórica permite alcançar maior velocidade, levando à um aumento da capacidade da via;

ii. Aumento de previsibilidade: um maior número de faixas que diminui o número de impedâncias, o que acarretará uma maior facilidade para desviar de acidentes, e um maior espaço para desviar de veículos que estejam realizando manobra;

iii. Melhoria do transporte público: maior número de faixas é possível a aplicação de faixas exclusivas para transporte público;

iv. Melhoria para pedestre: com a via estando com sentido único, ocorre uma diminuição de conflitos entre pedestres e os veículos durante a travessia, permitindo também uma maior acessibilidade.

Para Fernandes *et al* (2016) a implantação de um binário permite a otimização da via através do aproveitamento de toda a pista de rodagem e a modificação do seu perfil. Uma boa utilização da pista de rodagem consiste no uso de espaços que antes eram destinados a estacionamentos, ou espaços que não eram submetidas a algum uso. Já a alteração do perfil da via trata da distribuição de faixas de trânsito para o uso de ciclistas, transporte coletivo e o uso de veículos privados dentro da pista de rolamento.

Conforme Geron (2012) os binários proporcionam muitos impactos para uma cidade, como: (a) pode-se levar a retirada de faixas de estacionamentos; (b) as vias transversais podem sofrer impactos com os grandes números de veículos devido ao acesso ao binário; (c) com um trânsito mais intenso pode impactar no deslocamento a pé pela região; (d) pode-se mudar o zoneamento; (e) os passeios podem ser alterados, assim como as caixas carroçáveis. Como exemplo, cita Curitiba (PR), onde os números de binários vêm aumentando por serem uma solução para os problemas de trânsito da cidade.

Outras Prefeituras Municipais de grandes centros também vem implementando sistemas viários binários, como Boa Vista (RR), localizados na Avenida Princesa Isabel e Avenida

Carlos Pereira de Melo que tem acesso a Zona Leste a Zona Oeste da cidade (Teixeira et al, 2015), de Natal (RN), localizado na Av. Roberto Freire e as Ruas Dr. Sólon de Miranda Galvão e Walter Fernandes que dá acesso à orla de Ponta Negra, com o objetivo de permitir um maior fluxo e organização no tráfego de toda a região (Osório, 2017).

Prefeituras que implantaram sistemas viários binários identificam melhoria no trânsito (Madeira, 2014), principalmente quanto a fluidez nas vias. Para Fernandes et al (2016), em seu estudo que analisou a utilização de vias binárias como solução operacional no planejamento do transporte público urbano, os sistemas binários não só aumentaram o número de pessoas transportadas por hora pela via, como também melhorou a mobilidade das ruas em questão. Destacaram, ainda, que com o binário em funcionamento é possível a construção de faixas exclusivas de ônibus. As faixas exclusivas de ônibus, além de dar prioridade ao transporte público coletivo, elevam a velocidade média deste tipo de veículo, o que resulta no aumento da frequência do ônibus e consequentemente no melhor uso da frota. Fernandes et al (2016), sugerem, ainda, que com os binários os conflitos entre trajetórias de veículos, pedestres e ciclistas são diminuídos, além de aumentar a segurança para manobras de ultrapassagem e de amenizar congestionamentos causados pelas conversões à esquerda.

2.1. SISTEMAS VIÁRIOS BINÁRIOS IMPLANTADOS EM FORTALEZA

De acordo com IBGE (2018), o município de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, 5ª maior cidade do país, tinha uma população estimada em 2.669.342 pessoas, calculada a partir do censo de 2010, que contou 2.452.185 pessoas em uma densidade demográfica de 7.786,44 hab/km^2 em uma área total de 314,9 km^2.

A cidade possui aproximadamente 4.000 km de extensão de malha viária e uma frota de veículos estimada em 1.098.652 veículos, em dezembro de 2018, apresentando uma taxa de motorização de 2,43 hab./veículo, segundo IBGE (2018), dos quais 53,9% dos veículos registrados são automóveis e 28,2% são motocicletas (Motocicletas, Ciclomotores e Motonetas). Este crescimento dos últimos dez anos representa 70,4% e 216,8%, respectivamente.

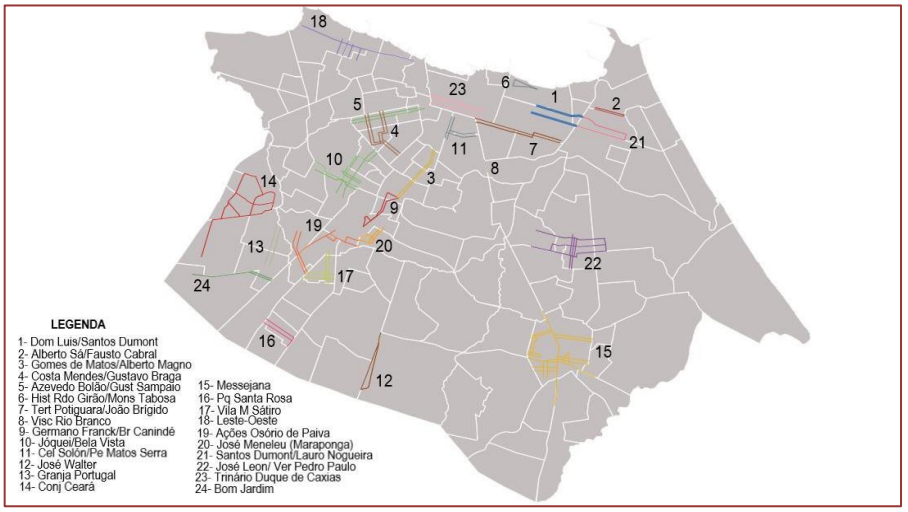
De acordo com o Relatório de Segurança Viária de Fortaleza (Fortaleza, 2018), foram registrados 14.694 acidentes, dos quais 11.150 com vítimas, sendo 1.439 atropelamentos, onde o principal veículo atropelador foi a Motocicleta. 95,6% das vítimas fatais são usuários considerados vulneráveis no trânsito (condutores e passageiros de motocicletas, ciclistas e pedestres). Os principais usuários a morrer no trânsito, são os ocupantes de motocicleta e os pedestres. No mesmo relatório, consta que 17% de todos os condutores excedem a velocidade permitida, gerando situações de risco de morte para usuários vulneráveis.

Com estas problemáticas históricas, em 2014, a Prefeitura de Fortaleza lançou o Plano de Ações Imediatas em Transporte e Trânsito de Fortaleza – PAITT (Fortaleza, 2015) com o objetivo de melhorar o trânsito da capital, aumentar a velocidade do transporte público, aliviar a pressão em alguns pontos nevrálgicos de congestionamento e dar mais elementos para estruturação e organização da política de gerenciamento de trânsito em Fortaleza.

Com a execução deste Plano de Ações Imediatas em Transporte e Trânsito de Fortaleza (PAITT), a Prefeitura de Fortaleza vem implantando soluções para a otimização da circulação e segurança viária para os pedestres e ciclistas e para beneficiar e dar mais segurança para pessoas com mobilidade reduzida. Dentre as intervenções, têm implantado

sistemas viário binários com uma conotação mais ampla de intervenção. Até 2019, já foram implantados 24 Binários em Fortaleza, conforme demonstrado na Figura 2, com intervenções complementares, tais como requalificação da iluminação pública e dos pavimentos, correção de drenagem, a implantação de prolongamentos de calçadas, faixas em diagonal, além de travessias elevadas para pedestres, dentre outras intervenções.

Figura 2 Mapa dos Binários de Fortaleza



Fonte: Os autores, 2020.

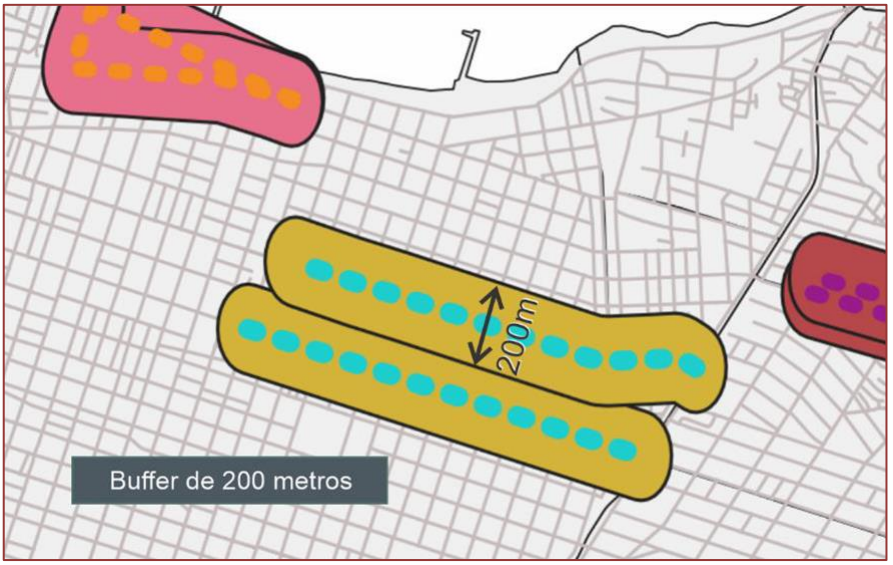
Madeira (2014) divulga afirmativas da Prefeitura de Fortaleza que os binários reduziram o tempo de permanência no trânsito, nos engarrafamentos a exemplo do binário da Avenida Dom Luís, que foi reduzido em cerca de 46%, superando as expectativas da Prefeitura, que previa uma diminuição de 40%.

Teixeira *et al*. (2015) em estudo sobre o impacto sobre o tráfego urbano devido implantação de sistema binário de avenidas na cidade de Fortaleza-CE, onde analisou parâmetros relacionados à Velocidade Média e ao Tempo de Viagem, através de dados comparativos nas Avenidas Santos Dumont e Dom Luís, na cidade de Fortaleza, estado do Ceará constatou que, de um modo geral, a implementação do binário foi satisfatória para o tráfego na região onde a solução foi implantada.

3. METODOLOGIA

Este estudo utilizou a metodologia “Antes” e “Depois”, em seu modelo Simples e por Grupo de Comparação (GC), usando os números de acidentes de 2009 a 2011, considerado o período “antes” e de 2016 a 2018, para o período “depois”, observando cinco binários implantados no município de Fortaleza nos anos de 2014 e 2015 e usando vias não binárias com características semelhantes às vias binárias, das quais compõem o grupo de comparação, considerando polígonos em uma distância de 200 metros ao redor dos grupos tratados e de comparação selecionados, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 Perímetro Estabelecido para o Estudo Antes e Depois – Buffer



Fonte: Os autores, 2020.

Para Bonfim e Torres (2018), é comum a comparação entre segurança e o número de acidentes. Para a realização deste estudo foram considerados os números de acidentes de três anos antes e de três anos após as implantações dos binários.

Os acidentes podem ser ocasionados por uma convergência de diversos fatores que sofrem alterações de forma autônoma ao longo do tempo. Existem efeitos de importantes fatores causais, como o tráfego de veículos, as condições e intensidade climáticas e a demanda de viagens que não podem ser medidos, entendidos e modelados e que refletem, juntamente com o efeito do tratamento realizado e de outras intervenções implementadas na região de estudo, nos resultados de segurança da via, ou, até mesmo a probabilidade de ocorrência de acidente pode variar ao longo do tempo, o que interfere na análise quando se utiliza o estudo “antes e depois” da intervenção (Hauer, 2002 apud Bonfim e Torres 2018).

Dado a isto, para realizar a análise de tratamentos em um grupo de estudo, têm-se duas principais tarefas a serem completadas. Primeiramente, precisa-se prever qual seria a segurança da entidade no período “depois” caso não houvesse tratamento e, por fim, estimar qual o nível de segurança das entidades tratadas no período “depois”. (Hauer, 2002 apud Bonfim e Torres 2018).

Hauer (2002, Apud Bonfim e Torres, 2018) identifica duas categorias básicas de estudos antes e depois (EAD) em função do nível de segregação da influência da variável de interesse (número de acidentes) de outras variáveis de confusão, são os EAD do tipo "simples" e com grupo de comparação.

Este método “antes” e “depois” consiste na comparação entre a contagem de acidentes no período antes do tratamento de uma certa entidade e a contagem de acidentes no período depois do tratamento, após extrair da base de dados as frequências de determinados eventos e prever uma variável de interesse (Bonfim e Torres, 2018).

Bonfim e Torres (2018) destaca que os estudos observacionais do tipo “antes” e “depois” são ferramentas de grande importância na análise de entidades viárias que sofrem

tratamentos e que contribui na avaliação da segurança viária, devido as intervenções necessárias serem, geralmente, reativas e a solução não é passível de testes antes da sua aplicabilidade.

Para Bonfim e Torres (2018) o uso de um grupo de comparação tem como principal objetivo identificar grupo de entidades que não sofreram tratamento (neste estudo estamos chamando de vias não binárias) e que possuam características similares as entidades tratadas (vias binárias). As entidades que não receberam tratamento são chamadas de grupo de comparação. Espera-se que a mudança na segurança no período "antes" e "depois" desse grupo indique como deveria ter variada a segurança do grupo de tratamento. Logo, considera-se a influência da variação de fatores causais que mudam com o tempo (Hauer, 2002 apud Bonfim e Torres, 2018).

Pelas afirmações de Bonfim e Torres (2018) o estudo observacional com grupo de comparação assume que os diversos fatores que afetam a segurança mudaram no período "antes" e "depois" na mesma maneira para o grupo de tratamento e de comparação e eles influenciam a segurança dos grupos da mesma maneira. Para estes autores o método de grupo de comparação estima especificamente os efeitos da segurança causados pelo tratamento, diferentemente do método simples que não faz distinção entre efeitos do tratamento e todos os outros fatores causais que variam com o tempo.

3.1. SELEÇÃO DA AMOSTRA

Para a realização deste trabalho foram selecionados cinco binários implantados em Fortaleza nos anos de 2014 e 2015. Conhecidos os binários de referência do estudo, foram identificadas vias com características similares das entidades tratadas e selecionadas para compor o grupo de comparação conforme demonstrado na Tabela 1.

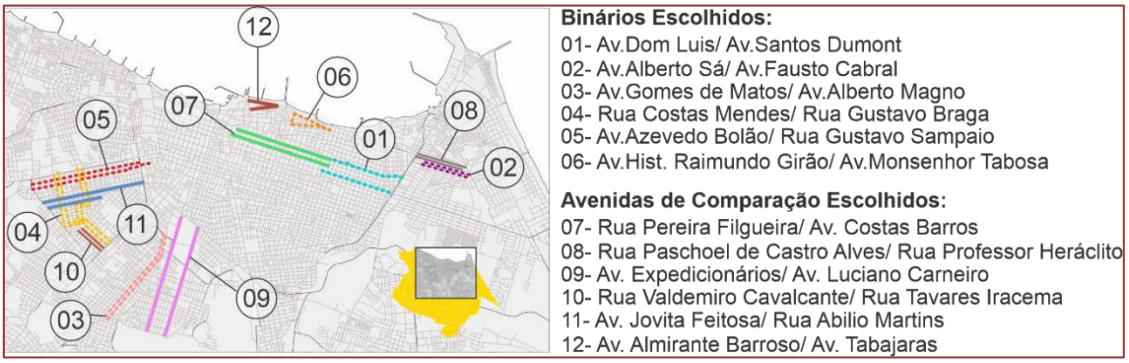
Tabela 1 Grupo Tratado e Grupo de Comparação

ID	GRUPO TRATADO BINÁRIOS	Data de Implantação	GRUPO DE COMPARAÇÃO VIAS NÃO BINÁRIAS
1	Av. Dom Luís/Av. Santos Dumont (Aldeota)	30/03/14	Rua Pereira Filgueira/Rua Costa Barros
2	Av. Eng. Alberto Sá/R. Fausto Cabral (Papicu)	27/09/14	Rua Paschoal de Castro Alves/Rua Professor Heráclito
3	Av. Gomes de Matos/R. Alberto Magno (Montese)	20/06/15	Avenida Expedicionário/Av. Luciano Carneiro
4	R. Prof. Costa Mendes/R. Gustavo Braga (Rodolfo Teófilo)	26/09/15	Rua Valdemiro Cavalcante/Rua Tavares Iracema
5	R. Azevedo Bolão/R. Gustavo Sampaio (Parquelândia)	11/07/15	Av. Jovita Feitosa/Rua Abílio Martins
6	Av. Hist. Raimundo Girão/Av. Mons. Tabosa (Praia de Iracema)	18/12/15	Av. Almirante Barroso/Av. Tabajaras

Fonte: Os autores, 2020.

As via binárias (grupo tratado) e as vias do grupo de comparação estão localizadas nos bairros Aldeota, Papicu, Montese, Rodolfo Teófilo e Praia Iracema, conforme demonstrado na Figura 4.

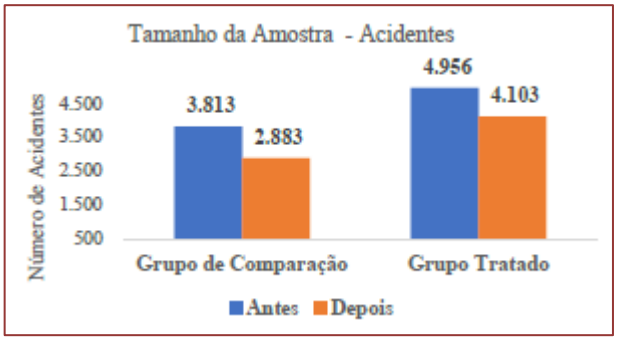
Figura 4 Binários Selecionados como Grupo Tratado e Vias de Grupo de Comparação



Fonte: Os autores, 2020.

Para a seleção das amostras foram considerados como data de referência o ano de implantação dos binários. Para o período "antes" foram considerados os três anos anteriores à data de referência e para o período "depois", três anos após à data de implantação dos binários. Os períodos selecionados foram os anos de 2009 a 2011, considerado o período "antes" e o período de 2016 a 2018, período "depois". Para esses critérios de seleção gerou-se uma amostra relativa ao grupo tratado de 4.956 acidentes no período "antes" e 4.103 ocorrência no período "depois", representando um decréscimo de 17,2% na amostragem. Para o grupo de comparação no período "antes" a amostra foi de 3.813 eventos e 2.883 no período "depois", conforme ilustrado no Gráfico 1.

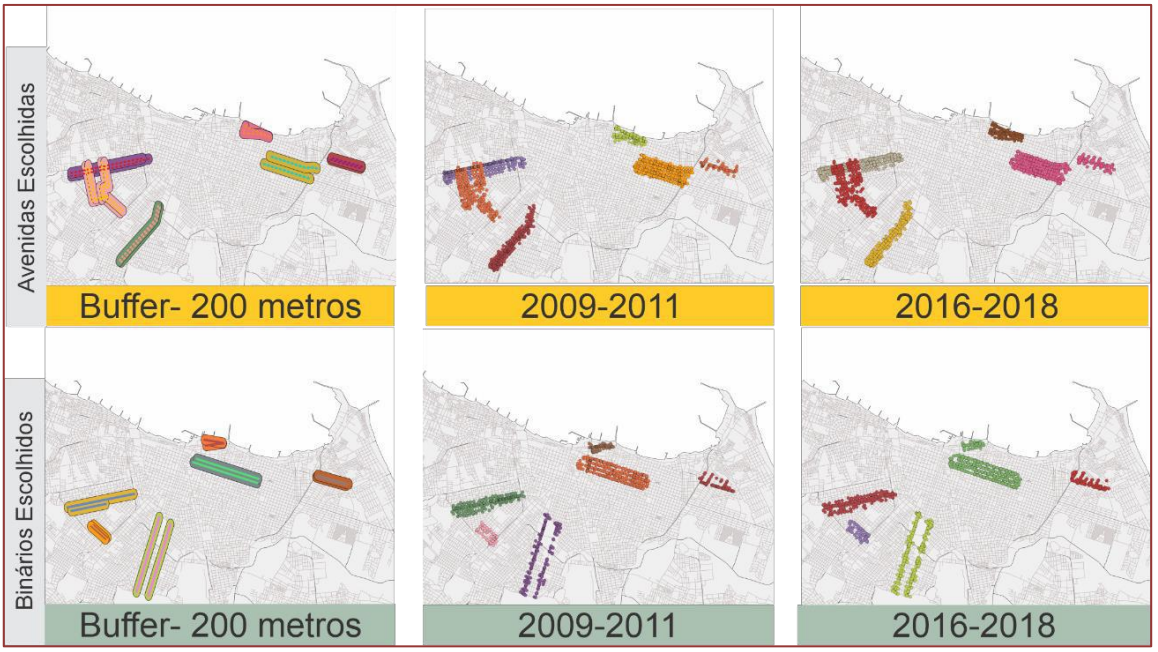
Gráfico 1 Tamanho da Amostra – Número de Acidentes Totais



Fonte: Os autores, 2020.

Ilustrativamente a amostra ficou distribuída conforme mapa da Figura 5.

Figura 5 Mapa da Distribuição das Amostras



Fonte: Os autores, 2020.

3.2. COLETA E ANÁLISE DOS DADOS

Os dados de acidentes foram coletados junto à Prefeitura Municipal de Fortaleza por meio do Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito de Fortaleza (SIAT-FOR) da Autarquia Municipal de Trânsito e Cidadania (AMC)[1]. Foram utilizadas as informações de todas as ocorrências coletadas relacionadas à acidentes de trânsito, registradas no SIAT no período entre 2009 e 2011 para a análise do " antes" e de 2016 a 2018, para a análise do "depois", com registros detalhados sobre local, tipo, data e horário do acidente, a severidade do acidente, detalhando a gravidade da ocorrência.

Em relação aos acidentes alvos para realização das análises, foram utilizados os dados relativos à quantidade de acidentes totais, ilesos, acidentes fatais e com vítimas feridas.

4. ESTUDOS OBSERVACIONAIS E SEUS RESULTADOS

A fundamental diferença entre o "método simples' do "grupo de comparação" está na hipótese assumida em relação à qual seria o número de acidentes na via de tratamento no período depois, se os binários não tivessem sido implantados (π).

A Tabela 2 apresenta os indicadores estimados nos dois métodos para a amostra do presente estudo.

[1] AMC é o órgão municipal responsável pela gerência do trânsito na cidade de Fortaleza

Tabela 2 Parâmetros Estimados nos Métodos Simples e Grupo Comparativo (GC)

Parâmetros	MÉTODO SIMPLES				MÉTODO GC			
	Total	Ilesos	Feridos	Fatais	Total	Ilesos	Feridos	Fatais
π	4.956	3.719	1.209	28	3.746	1.848	1.703	30
λ	4.103	2.060	2.017	26	4.103	2.060	2.017	26
VÂR{π}	4.956	3.719	1.209	28	25.415	8.106	9.937	129
VÂR{λ}	4.103	2.060	2.017	26	4.103	2.060	2.017	26
δ	853	1.659	(808)	2	(357)	(212)	(314)	4
VÂR{δ}	9.059	5.779	3.226	54	29.518	10.166	11.954	155
θ	0,828	0,554	1,668	0,929	1,093	1,112	1,180	0,766
σ{π}	70,40	60,98	34,77	5,29	159,42	90,03	99,68	11,38
σ{λ}	64,05	45,39	44,91	5,10	64,05	45,39	44,91	5,10
σ{δ}	95,18	76,02	56,80	7,35	171,81	100,83	109,33	12,47
σ{θ}	0,017	0,015	0,061	0,244	0,049	0,059	0,074	0,288
Média	17,2%	44,6%	-66,8%	7,1%	-9,3%	-11,2%	-18,0%	23,4%
Limite Superior (IC 95%)	20,7%	47,7%	-54,7%	56,0%	0,6%	0,7%	-3,3%	81,0%
Limite Inferior (IC 95%)	13,7%	41,6%	-79,0%	-41,7%	-19,2%	-23,1%	-32,7%	-34,3%

Fonte: Os autores, 2020.

Analisando os dados obtidos para o grupo tratado (binários) foi possível observar que ocorreram no período anterior à implantação dos binários, na área dos um total 4.956 acidentes e 4.103, no período "depois". Foram observados 1.209 acidentes com vítimas (feridos) no período "antes" e 2.017 no período "depois". Em relação aos acidentes sem vítimas (ilesos) observou-se 3.719 "antes" e 2.060 "depois". Acidentes fatais foram 28 "antes" e 26 "depois".

Para avaliar o tamanho da amostra em termos de acidentes de trânsito no período anterior utilizando a metodologia proposta pelo Hauer (2002, apud Bonfim e Torres, 2018), com base nos valores de θ, definiu-se o valor da relação entre os períodos antes e depois (rd) para cada entidade de estudo de três anos antes e três anos depois, obtendo um valor médio de 1,00, já que os anos "antes" e "depois" são iguais. Pela análise preliminar do método simples o valor de θ postulado foi de 0,83 e desvio padrão σ{θ} de 0,02. Portanto, o número de acidentes no período "antes" necessários para ter uma boa identificação do efeito do tratamento é de 4.886 acidentes. Dessa forma, como a coleta de dados possui uma quantidade de 4.956 acidentes no período "antes" do tratamento, verifica-se a validade do estudo em questão.

Estima-se que se os binários não tivessem sido implantados o número de acidentes teria sido reduzido para 3.746 acidentes, decorrente dos efeitos dos "fatores globais" que atuaram contribuindo para a redução dos acidentes de trânsito. No entanto, após a implantação destas vias binárias este número subiu para 4.103 acidentes, representando um aumento médio de 9,33% no total de acidentes, para um intervalo de confiança de 95%.

Do mesmo modo, foram estimados redução para 1.848 acidentes sem vítimas (ilesos) decorrentes da contribuição de fatores externos e com a implantação dos binários foram observados 2.060 acidentes com pessoas ilesas, equivalente a um aumento médio de 11,21% dos casos. Acidentes envolvendo pessoas feridas foram 2.017, após a implantação dos binários, contra uma expectativa estimada de 1.703 sob os efeitos de fatores globais, representando um aumento médio de 18%, para um intervalo de confiança de 95%.

No entanto, em relação aos acidentes com vítimas fatais observou-se uma redução média de 23,38%, decorrente da junção dos efeitos globais e da implantação dos binários que contribuíram para a redução deste tipo de gravidade nos acidentes de trânsito. Entretanto, devido ao baixo número de observações, o resultado não apresentou significância estatística para um intervalo de confiança de 95%.

A Tabela 4 apresenta os resultados dos valores médios de θ e os limites dos intervalos de confiança para cada cenário analisado pelo método com grupo de comparação (GC). Percebe-se uma discrepância entre os resultados obtidos pelos dois métodos para a quantidade total de acidentes, com vítimas (feridos) e sem vítimas (ilesos). Observa-se que os resultados com o GC apresentam valores médios maiores que o método simples em relação aos totais de acidentes, com feridos e ilesos. Isso sugere que para estes tipos de ocorrência não houve melhoria na segurança viária das áreas analisadas devido à implantação do sistema viário binário.

Tabela 4 Valores médios de θ com intervalo de confiança de 95% para o método com GC

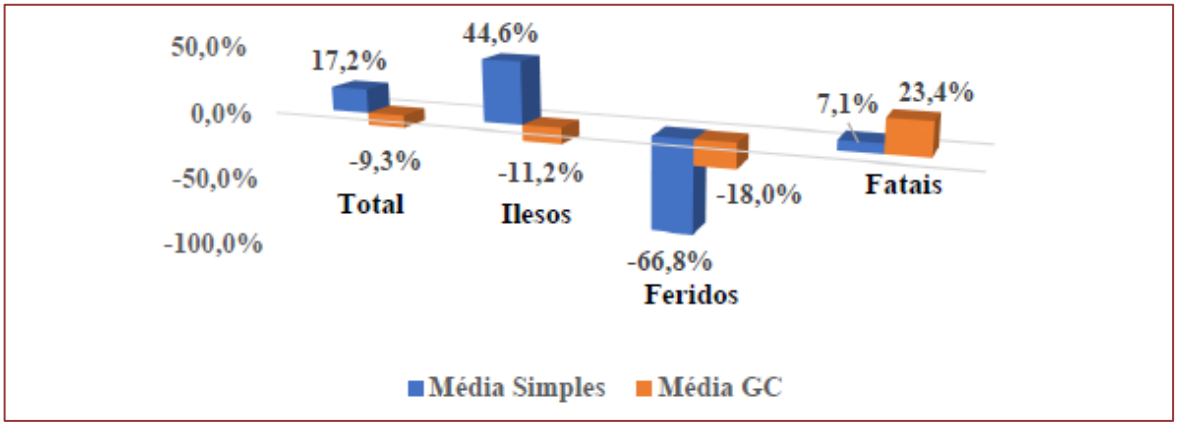
Parâmetros	Total	Ilesos	Feridos	Fatais
θ	1,09	1,11	1,18	0,77
θ+2σ{θ}	1,19	1,23	1,33	1,34
θ-2σ{θ}	0,99	0,99	1,03	0,19

Fonte: Os autores, 2020.

4.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Sendo a redução do número esperado de acidentes a diferença 1- θ, o Gráfico 3 apresenta os valores percentuais médios de variação, com intervalo de confiança 95% (2σ). Neste caso, os números estimados positivos indicam redução e os números negativos indicam elevação no número de acidentes.

Gráfico 3 Comparação na alteração do nível de segurança pelo método simples e com GC



Fonte: Os autores, 2020.

Conforme demonstrado no Gráfico 3 o grupo de comparação, com exceção dos acidentes com vítimas fatais, teve um aumento percentual no número de acidentes. Em relação a quantidade de acidentes totais, pode-se inferir que a implantação do binário pode ter influenciado o aumento, em média de 9,3% no número esperado de acidentes para um intervalo de confiança de 95%, podendo variar entre uma redução esperada de 0,57% a um aumento médio de 19,22% no número de acidentes, o que se sugere estudo mais aprofundado para confirmar esta hipótese.

Quanto aos acidentes fatais houve uma redução no número de acidentes. Pelo método GC a redução foi em média 23,4% dos acidentes com vítimas fatais, apesar de se estimar um intervalo de crescimento entre 34,3% a uma redução de 81% neste tipo de acidente. No entanto, devido ao baixo número de observações, o resultado não apresentou significância estatística para um intervalo de confiança de 95%, razão pela qual deve ser melhor investigado por outras metodologias.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos estudos observacionais realizados, verificou-se que a metodologia com a utilização do grupo de comparação apresenta resultados mais específicos sobre o efeito isolado da implantação dos binários sobre a segurança do tráfego viário. Foi observado um valor médio de índice de efetividade (θ) e intervalo de confiança de 95% de 0,83 [0,79 – 0,86] (simples) e 1,09 [0,99 – 1,19] (grupo de comparação). Assim, utilizando os resultados obtidos pelo grupo de comparação, a implantação do sistema viários do tipo binário pode ter influenciado o aumento em média de 9,33%, enquanto se esperava uma redução no número esperado de acidentes em torno de 24%.

Para os acidentes sem vítimas (Ilesos) houve um aumento em média de 11,21% em relação ao número esperado de acidentes devido a implantação do binário, embora fatores globais externos tenham contribuindo em média com uma redução de 44,61% (simples) no número esperado de acidentes. Quanto aos feridos, fatores globais externos contribuíram com o aumento médio de 66,83% em relação a quantidade esperada de acidentes, em um intervalo de confiança de 95%, variando entre -78,96% a -54,71%, enquanto a implantação dos binários reduziu este aumento para 18%, em média.

Na análise do grupo de comparação, no total de acidentes, observou-se uma estimativa de redução no número destas ocorrências em decorrência dos efeitos de fatores globais agregado aos efeitos das implantações dos binários que não se concretizou observado o desempenho dos binários nos períodos "depois", o que se pode inferir que sem considerar os efeitos globais dos fatores externos os binários teve um efeito inverso, podendo ter influenciado no aumento dos acidentes. As hipóteses explicativas para estes resultados podem ser a mudança de faixas mais constantes, aumento da velocidade médias dos veículos e ônibus, pedestre não tem mais o canteiro central para travessar em duas etapas (cruzar mais faixas de uma só vez), entres outros riscos que um sistema binário pode trazer para a segurança de tráfego. Para testar estas hipóteses, de forma isolada ou agregada, sugere-se estudos aprofundados para avaliar com mais profundidade como essas variáveis impactam a eficácia dos sistemas viários binários, principalmente atestar se a hipótese da melhoria da fluidez impacta diretamente os vulneráveis, por ficarem mais expostos aos limites de velocidades dos condutores. Ainda como recomendação de trabalhos futuros, poderia ser citado um estudo mais aprofundado sobre a tipologia dos acidentes desse aumento observado, se envolvendo pedestres, ciclistas, motociclistas? Este tipo de estudo pode ajudar na definição de uma política para aprimorar a segurança nesse tipo de sistema.

REFERÊNCIAS

[1] **BONFIM**, Willian G., **TORRES,** Caio A. **Avaliação de Desempenho da Segurança Viária de Intervenções em Interseções Urbanas Não Semaforizadas**. 32 Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Gramado, 04 de novembro a 07 de novembro de 2018. http://www.anpet.org.br/anais32/documentos/2018/Trafego%20Urbano%20e%20Rodoviario/CT/4_692_CT.pdf. Acesso em 14/01/2020.

[2] **BRASIL. 2013.** MINISTÉRIO DA CIDADE. **Cartilha da Política Nacional de Mobilidade Urbana** [recurso eletrônico]. Ano 2013. Disponível em: http://www.portalfederativo.gov.br/noticias/destaques/municipios-devem-implantar-planos-locais-de-mobilidaderbana/CartilhaLei 12587site.pdf. Acesso em 14/01/2020.

[3] **FERNANDES**, C.W.N.; TAGLIALENHA, S.L.S.; TIBURCIO, F.S.; SILVA, V.M.D. Análise da Utilização de Vias Binárias como Solução Operacional no Planejamento do Transporte Público Urbano. 7 Congresso Luso Brasileiro para Planejamento Urbano, Regional, Integrado e Sustentável. Contrastes, Contradições e Complexidades. Maceió – Brasil, 05 a 07 de outubro de 2016.

[4] **FORTALEZA.2015. Prefeitura Municipal de Fortaleza**. Plano de Mobilidade de Fortaleza – PlanMob. Instituto de Planejamento de Fortaleza – IPLANFOR. Junho de 2015.

[5] **FORTALEZA. 2018. Prefeitura Municipal de Fortaleza**. RELATÓRIO ANUAL DE SEGURANÇA VIÁRIA, 2018. Fortaleza 2018 [recurso eletrônico]. Estatísticas Observatório de Segurança Viária de Fortaleza. Disponível em <https://www.unifor.br/web/osv/estatisticas>. Acesso em 15/01/2020.

[6] **GERON,** Victor. Vida e Cidadania [15/01/2012]. Saiba a importância e o impacto dos binários no trânsito. Disponível em <www.gazetadopovo.com.br › . Acesso em 15/01/2020.

[7] **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.** (2018). Fortaleza. Disponível em Cidades@: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/pesquisa/22/28120. Acesso em 15/01/2020.

[8] **MADEIRA,** Vanessa. Binário reduz tempo de permanência no trânsito. Diário do Nordeste, 2014. Disponível em: <https://diariodonordeste.verdesmares.com. br/editorias/metro/binario-reduz-tempo-de-permanencia-no-transito-1.105128 1>. Acesso em: 20/01/2020

[9] **OSÓRIO**, M.S., Estudo de Implantação de Sistema Binário nas Ruas de Acesso à Praia de Ponta Negra – RN; Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN. 2017.

[10] **TEIXEIRA**, M.J.L., Neto, J.C.P., Oliveira, F.H.L., Aguiar, M.F.P. O Impacto Sobre o Tráfego Urbano Devido Implantação de Sistema Binário de Avenidas na Cidade de Fortaleza – CE. XXIX Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Ouro Preto, 9 a13 de novembro de 2015.

Capítulo 11

The use of FactSage™ to determine crystalline phases in blast furnace slag-based glass ceramic

Cátia Fredericci

Abstract: FactSage™ is a thermodynamic simulation software widely utilized in both industry and academic institutions, including universities and research centers. It is particularly effective for calculating properties and equilibria of complex chemical systems, especially in high-temperature phase equilibria, which are relevant to the metallurgy and ceramics industries. This work aimed to employ FactSage to determine the crystalline phases developed during the crystallization of glass made from blast furnace slag. The glasses were produced by melting and quenching a mixture of blast furnace slag (80% and 60% by weight) and soda-lime-silica glass (20% and 40% by weight). After the resulting glasses were heat-treated, the developed crystalline phases were analyzed using X-ray diffraction. These results were then compared to those obtained through computational simulation. The findings indicated that FactSage is a promising tool for designing glass ceramics.

Keywords: glass-ceramic, slag, cullet, FactSage, thermodynamic simulation.

1. INTRODUCTION

The volume of blast furnace slag produced can vary, but it is significant; approximately 270 kg of slag is generated for each ton of pig iron produced[1]. In Brazil, around 26 million tons of pig iron were produced in 2023, resulting in an estimated 7 million tons of blast furnace slag[2]. This creates a pressing need for efficient exploitation of slag, which is important for both economic opportunities and environmental management. While most of the blast furnace slag generated in Brazil is utilized in cement and concrete production[3], a surplus can be applied to other uses. Rawlings et al.[4] reported that blast furnace slag was the first silicate waste studied as a potential source material for glass ceramic in building applications. Research efforts in Brazil and around the world have focused on exploring the potential of slag for glass-ceramic production [5-10]. Glass-ceramics are polycrystalline materials created either through controlled nucleation and crystallization of monolithic glass or by sintering and crystallization of glass powder[11]. Fredericci et al.[5] investigated the crystallization and properties of glass and glass ceramics made from 100% blast furnace slag sourced from CSN (Companhia Siderúrgica Nacional – Volta Redonda, Brazil). They found that melilite (a solid solution of gehlenite [$Ca_2Al_2SiO_7$] and akermanite [$Ca_2MgSi_2O_7$]) was the main crystalline phase present in the glass-ceramic. According to the latest survey by the Technical Association of Brazilian Glass (ABIVIDRO), approximately 47% of glass is recycled in Brazil[12]. Considering the annual production of 3.2 million tons of hollow and flat glass[13], and the low rate of glass recycling in the country, combining blast furnace slag with recycled glass presents a valuable opportunity for producing glass ceramics.

2. EXPERIMENTAL

2.1. RAW MATERIALS, MELTING, AND CHEMICAL ANALYSIS

The glass was produced by melting a mixture of slag from USIMINAS (Minas Gerais, Brazil) and cullet (soda-lime-silica glass from bottles), in the proportions shown in Table 1. To remove metallic iron from the slag, magnetic separation was utilized. Both the slag and glass powder had a particle size of less than 100 mesh (150 μm). Batches weighing 50 grams were melted in a homemade alumina-magnesia (AMS) spinel crucible. The compositions of the slag, cullet, and glass were determined using X-ray fluorescence (XRF) with a Philips Analytical XRF apparatus.

Table 1 – Compositions of slag and cullet mixtures (wt%), temperature and time of melting

Glass	Slag (%)	Cullet (%)	Temperature (°C)	Time (h)
80S20C	80	20	1350	2
60S40C	60	40	1350	2

2.2. COMPUTATIONAL SIMULATION USING FACTSAGE

FactSage 6.4 was utilized to calculate the viscosity of glasses obtained from three different compositions: 100 wt% slag (100S), 80S20C, and 60S40C, as detailed in Table 1. The glasses database was used because it is applicable over the entire temperature range, including temperatures at and below the glass transition temperature. Additionally, thermodynamic calculations were performed using FactSage™ to predict the phases that

would form during solidification, employing the FToxid database and selecting the liquid solution FToxid_SLAGA.

2.3. DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS (DTA)

The resulting glasses were analyzed using differential thermal analysis (DTA) with a Netzsch model 402 to determine the glass transition temperature (T_g) and crystallization temperature (T_c) for powder samples with a particle size between 170 mesh and 100 mesh. Approximately 100 mg of glass was placed in a platinum crucible, and the analysis was conducted at a heating rate of 20 °C/min.

2.4. HEAT TREATMENT SCHEDULE

Glass samples measuring approximately (1 x 1) cm were sanded using silicon carbide (SiC) water slurries on flat brass tools. They were then polished to an optical grade with cerium oxide slurry. The polished samples underwent heat treatment in the air atmosphere in an electric furnace, first at 720 °C for 1 hour to promote nucleation, followed by exposure to 870 °C for 20 minutes for crystal growth.

2.5. SCANNING ELECTRON MICROSCOPY

The samples were immersed in a solution of 0.2 vol% HF (48 wt%) for 20 seconds to reveal the crystalline phase developed on the surface of the glass ceramic. After removal from the solution, the samples were rinsed first with water and then with acetone, dried at 80 °C for 30 minutes, and coated with gold for analysis using a JEOL 6300 scanning electron microscope (SEM). Additionally, one sample of 80S20C glass that had been heat-treated at 870 °C for 2 h was cut, and its cross-section was analyzed by SEM.

2.6. X-RAY DIFFRACTION

To investigate the crystalline phases corresponding to the peaks in the DTA thermogram, the powdered glasses were heat-treated at the temperatures indicated by the exothermic peaks in the DTA curve, with a heating rate of 20 °C/min. Once the desired temperature was reached, the samples were immediately removed from the furnace and allowed to cool to room temperature. The crystalline phases were identified using an X-ray powder diffractometer (Shimadzu XRD 6000), employing cobalt Kα radiation.

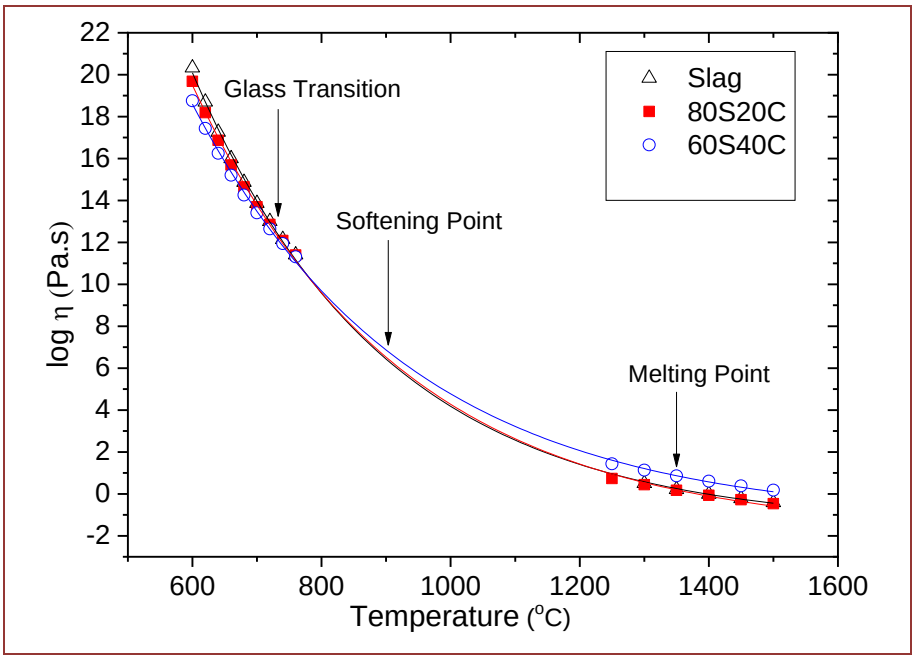
3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1. GLASS MELTING AND GLASS COMPOSITION

Varshynea and Mauro [14] noted the significance of viscosity (η) in glass manufacturing processes, identifying four standard viscosity reference points commonly used: the working point (10^3 Pa.s), the softening point ($10^{6.5}$ Pa.s), the annealing point (10^{12} Pa.s), and the strain point ($10^{13.5}$ Pa.s). Additionally, the viscosity at the melting point is typically below 10 Pa.s. To determine the appropriate temperature for melting glasses with nominal compositions of 80S20C and 60S40C, the viscosity concerning temperature was calculated using FactSage 6.4. The results are illustrated in Figure 1. Both glasses were

melted at 1350 °C, as the calculations indicated that the viscosity at this temperature is below 10 Pa.s, ensuring effective refining and suitable viscosity for pouring the glass into a stainless steel mold. The glass pieces obtained were then annealed at 700 °C (with viscosity around 10^{12} Pa.s, as shown in Figure 1) for 30 minutes to eliminate residual stress. As will be discussed in the next section, this temperature is closely correlated with results obtained from differential thermal analysis (DTA). Interestingly, while the viscosity of the 60S40C glass is higher at elevated temperatures compared to the 80S20C glass, the composition of the 60S40C glass contains a greater amount of Na_2O - a potent glass modifier that breaks Si-O-Si bonds - and typically reduces the viscosity of silicate melts. However, this is counteracted by an increase in the SiO_2 content and a decrease in other glass modifiers, such as CaO and MgO, in the 60S40C composition.

Figure 1 – Viscosity of the slag, glass 80S20C and 60S40C determined by FactSage™ 6.4.



The selection of refractory materials is a critical step in the glass melting process. Since the slag contains more CaO and MgO than SiO_2 and Al_2O_3, it tends to be alkaline, which can cause corrosion of the commonly used AZS (Al_2O_3-ZrO_2-SiO_2) refractories in the glass industry. Fredericci and Morelli [15] conducted a study on the corrosion of AZS and AZ (Al_2O_3-ZrO_2) crucibles after melting a nominal 80S20C glass composition at 1360 °C for 2 hours. They found a corrosion interface between the glass and both refractory materials. Additionally, Li et al. [8] reported extensive corrosion experiments on electrocast AZS refractories using molten CaO-Al_2O_3-SiO_2. In the present work, the glass was melted in a homemade alumina-magnesia crucible to minimize glass corrosion as much as possible. As shown in Table 2, the 80S20C glass composition exhibited 9.78 wt% Al_2O_3 and 6.43 wt% MgO, compared to the nominal composition of 8.94 wt% Al_2O_3 and 5.94 wt% MgO, indicating slight corrosion of the crucible. In contrast, the composition of the 60S40C glass after melting was similar to the nominal one, suggesting that the MgO-Al_2O_3 crucible was suitable for melting this type of glass.

Table 2 – Chemical analysis of the slag (S), cullet (C), nominal and measured compositions of the glasses 80S20C and 60S40C (wt%)

Oxides	Slag (S)	Cullet(C)	80S20C		60S40C	
			Nominal	Measured	Nominal	Measured
CaO	42,33	11,20	36,10	35,11	29,88	29,71
SiO_2	36,94	72,80	44,60	44,27	51,28	51,77
Al_2O_3	10,64	2,13	8,94	9,78	7,23	6,99
MgO	7,38	0,16	5,94	6,43	4,49	4,56
Fe_2O_3	0,31	0,04	0,27	0,24	0,20	0,19
TiO_2	0,89	0,01	0,71	0,71	0,53	0,52
MnO	0,52	0,0	0,42	0,41	0,31	0,30
K_2O	0,46	0,09	0,38	0,39	0,32	0,29
Na_2O	0,34	13,20	2,89	2,45	5,48	5,39

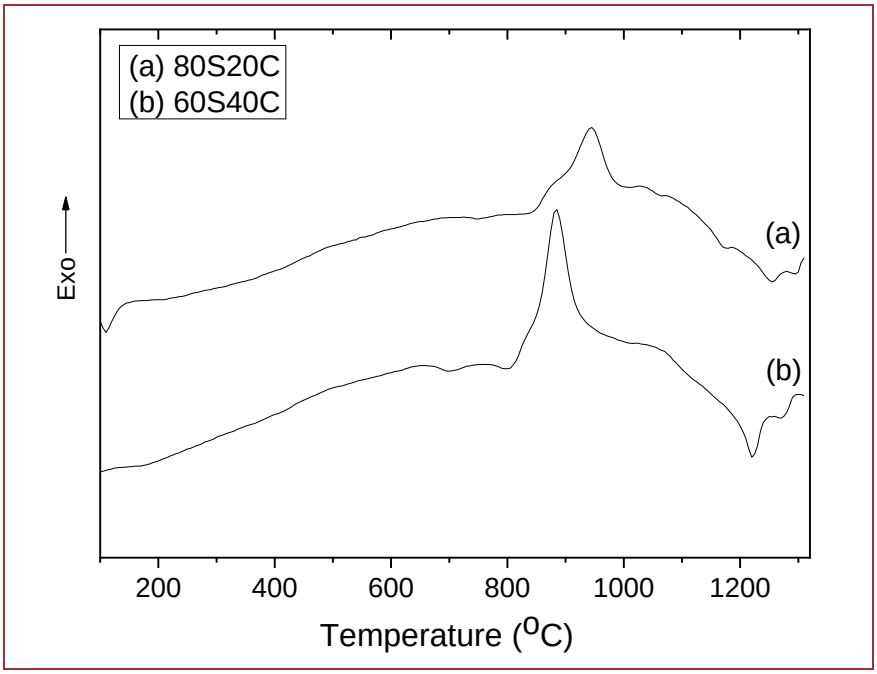
3.2. DTA ANALYSES

Figure 2 presents the DTA curves obtained from the glasses, while Table 3 lists the characteristic temperatures derived from these curves. For the 80S20C glass, there is an inflection point at about 710 °C, which corresponds to the glass transition temperature (T_g). Additionally, an exothermic peak at 945 °C is attributed to crystallization (T_c), and an endothermic peak at 1254 °C is associated with the melting of certain crystal phases (T_m). The DTA trace for the 60S40C glass exhibits similar behavior; however, both the Tg (670 °C) and Tc (884 °C) are shifted to lower temperatures. Relating the decrease in T_g to these complex glass compositions is not straightforward. As shown in Figure 1, adding cullet to the slag reduces viscosity within the low-temperature range of 600 °C to 760 °C, with the 60S40C glass exhibiting a lower viscosity. It is important to note that the glass transition temperature is not a fixed value; it varies based on the measurement technique and heating rate used. The temperature at which the viscosity reaches 10^{12} Pa·s, as calculated by FactSage 6.4, is approximately 720 °C, which is close to the values calculated for the glasses studied in this work.

Table 3 – Typical temperatures of the DTA curves, where T_g is the glass-transition temperature, T_c is the crystallization peak temperature, and T_m is the melting point of crystalline phases

Glass	T_g (°C)	T_c (°C)	T_m (°C)
80S20C	710	945	1254
60S40C	690	884	1220

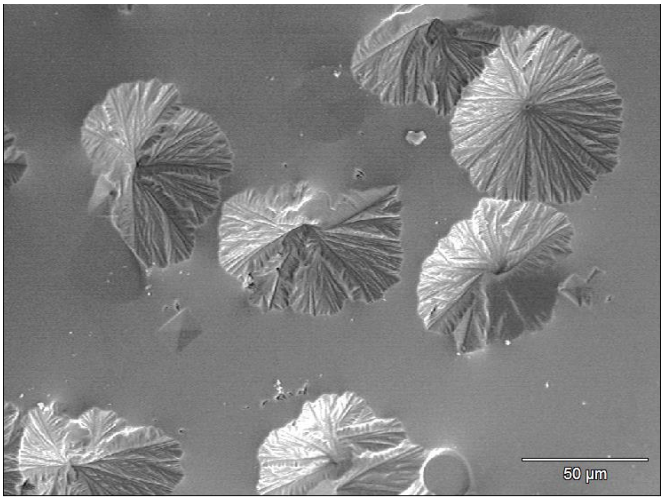
Figure 2 – DTA curves of the powdered glass samples (-100 + 170) mesh



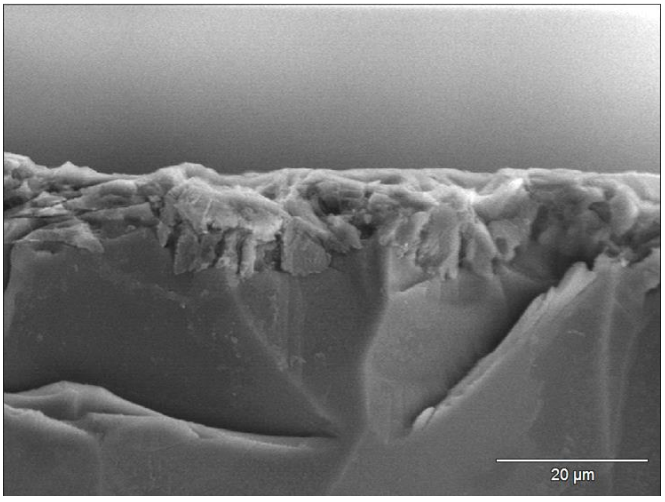
3.3. GLASS CRYSTALLIZATION

Samples of the as-quenched glass were heat-treated at 720 °C for 1 hour for nucleation, followed by treatment at 870 °C for 20 minutes to promote crystal growth. These temperatures were selected because they fall between the glass transition temperature (T_g) and the maximum peak temperature (T_c), which are 945 °C and 884 °C for the 80S20C and 60S40C glasses, respectively. Figures 2 and 3 show micrographs obtained through scanning electron microscopy (SEM) for both glass compositions. Crystals developed only on the surface of the heat-treated samples; no crystals were observed in the bulk material, even after extended treatment times at 720 °C for 20 hours, followed by 870 °C for 2 hours. It has been reported that Fe_2O_3 and TiO_2 are commonly used as nucleating agents for alumino-silicate glass ceramics, facilitating volume crystallization. However, the quantities of these oxides present in the glass compositions studied (as shown in Table 2) were insufficient to act as effective nucleating agents. Figure 2b presents SEM micrograph of a cross-section of a sample of the 80S20C glass, which was heat-treated at 870 °C for 2 h. It shows that dendritic crystals grew from the surface into the volume, but no crystals formed within the bulk of the glass. These observations are consistent with the results from differential thermal analysis (DTA), which indicated broad crystallization temperature peaks, suggesting that the surface crystallization process was predominant [16]. For the surface-crystallized 80S20C glass, the dominant crystal morphology was spherulitic-dendritic, with small rectangular crystals forming as a minority phase. In contrast, for the 60S40C glass, larger rectangular crystals were observed compared to those in the 80S20C crystallized glass.

Figure 3 - (a) SEM micrographs of the surface of the glass 8020C treated at 720 °C/ 1h and 870 °C/20 min and (b) cross-section of one sample of the same composition but heat-treated at 870 °C/1h



(a)



(b)

Figure 4 - SEM micrographs of the surface of the glass 60S40C treated at 720 °C/ 1h and 870 °C/20 min

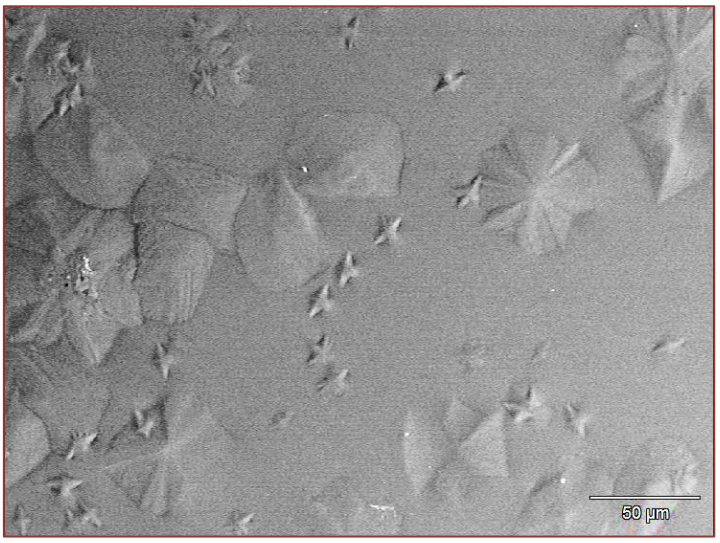


Figure 5 illustrates the simulation of the solidification of blast-furnace slag glass based on thermodynamic equilibrium. At 1350 °C, the system remains in a liquid state, confirming the temperature used to melt the glass. The first phase to develop is melilite, a solid solution of gehlenite ($Ca_2Al_2SiO_7$) and akermanite ($Ca_2MgSi_2O_7$). This is followed by merwinite ($CaMgSi2O_8$), which is metastable, as observed by Fredericci et al. [6]. The thermodynamic simulation for the glass composition 80S20C (Figure 6) indicates that melilite continues to be the major crystalline phase, but is accompanied by wollastonite (β-$CaSiO_3$). This shift occurs due to a decrease in the amounts of aluminum and magnesium - elements essential for the formation of melilite - as soda-lime-silica glass is added to the slag. It is also noteworthy that the high-temperature phase of wollastonite, α-$CaSiO_3$, transforms into β-$CaSiO_3$ (WOLL) at lower temperatures [17]. The predominance of these phases is confirmed in the diffractogram of the 80S20C glass heat-treated at 820 °C (Figure 8), aligning with the results obtained from the computational simulation. Minor phases such as nepheline ((Na, K)$AlSiO_4$) and cPyrA (pyroxene) were not identified in the diffractogram, potentially due to their low abundance during heat treatment or because the temperature and duration (820 °C for 20 minutes) were insufficient for their formation in the glass-ceramic. It is essential to emphasize that the computational simulations conducted using FactSage consider only thermodynamic parameters, not kinetic ones. As the amount of soda-lime-silica glass increases in the blast furnace slag, resulting in the composition 60S40C (Figure 7), melilite disappears as a crystalline phase (below 1030 °C), leaving wollastonite as the dominant phase at low temperatures. Other phases such as cPyrA, nepheline, and NCSO (devitrite – $Na_2Ca_3Si_6O_{16}$) were absent for the reasons mentioned above.

Figure 5 - Thermodynamic simulation of blast furnace slag solidification performed using FactSage™ software version 6.4

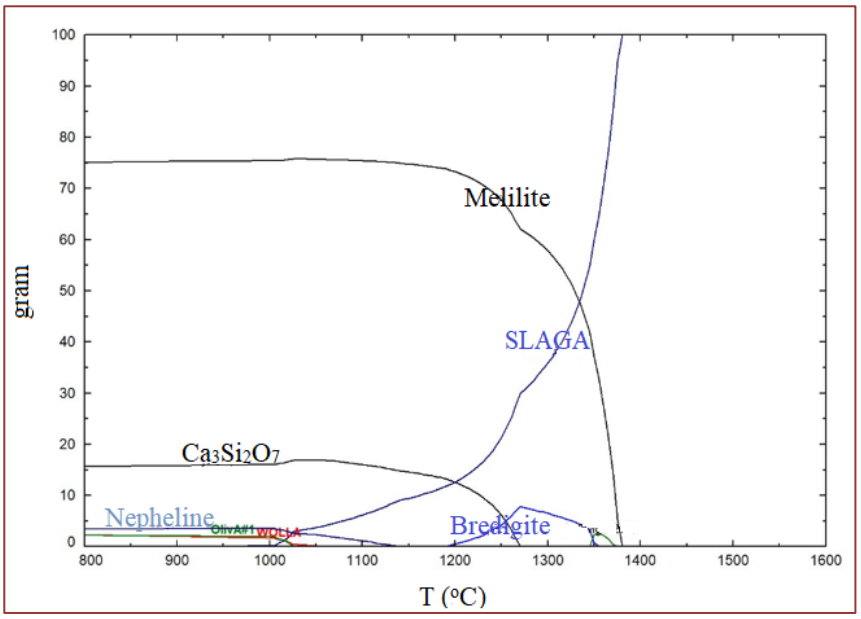


Figure 6 - Thermodynamic simulation of 80S20C solidification performed using FactSage™ software version 6.4

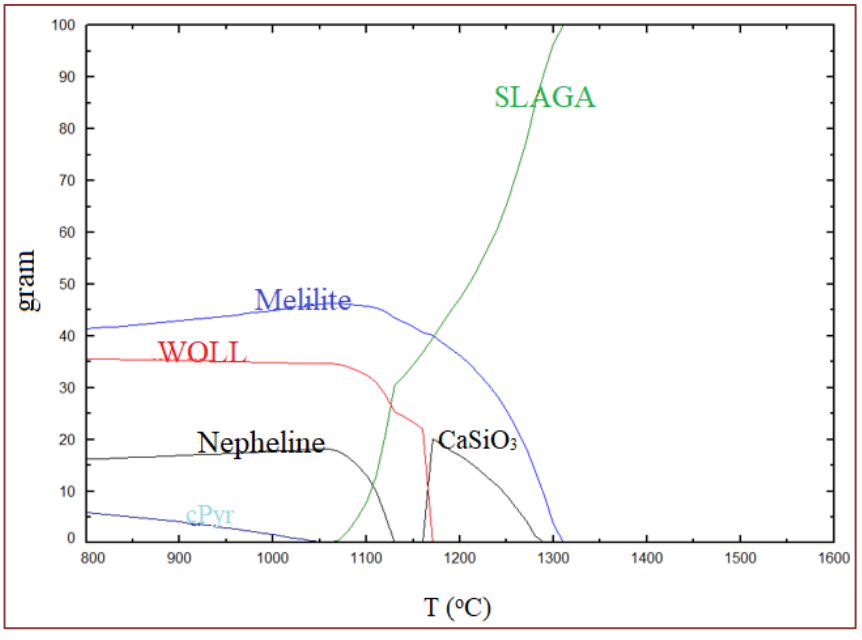


Figure 7 - Thermodynamic simulation of 60S40C solidification performed using FactSage™ software version 6.4

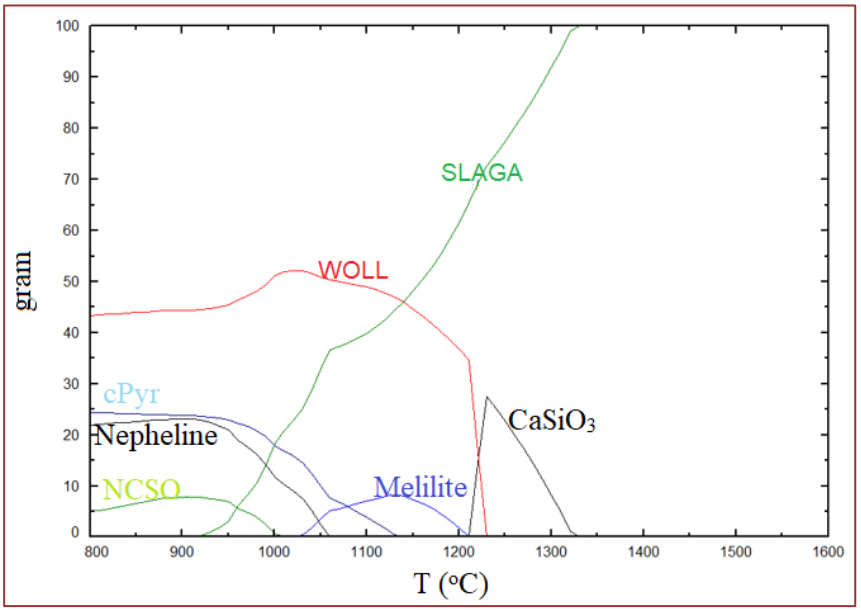
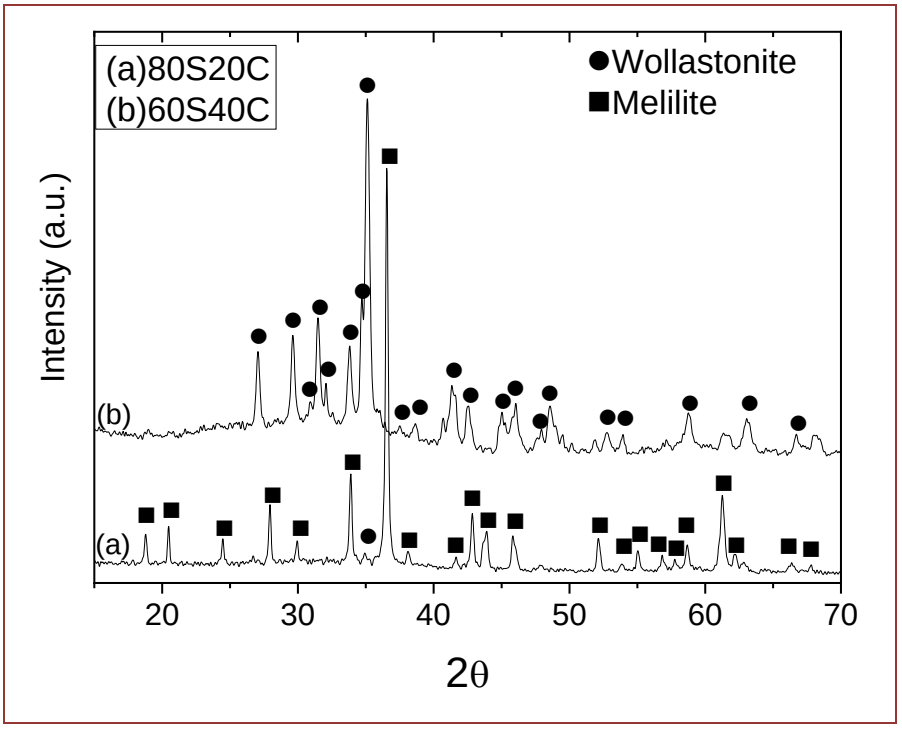


Figure 8 - X-ray diffractograms of the powdered glass 80S20C and 60S40C heat-treated at 870 °C/20 min. Cobalt Kα radiation



4. CONCLUSIONS

Glass and glass-ceramic were successfully produced from blast furnace slag and soda-lime silica glass. Differential thermal analysis (DTA) and scanning electron microscopy revealed that the glasses experienced heterogeneous surface crystallization. Notably, the primary crystalline phase shifted from melilite to wollastonite as the proportion of glass cullet in the composition increased. This finding was determined using FactSage and confirmed through X-ray diffraction analysis.

ACKNOWLEDGMENT

The author expresses gratitude to Tiago Ramos Ribeiro for his assistance with FactSage and to USIMINAS for donating blast furnace slag.

REFERENCES

[1] IEA – Part of the Energy Technology Perspectives Series - Iron Steel Technology Road map – Towards more sustainable steel making, 2020, 1-190 – **https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/10/iron-and-steel-technology-roadmap_040b14d5/3dcc2a1b-en.pdf,** accessed on January 2025.

[2] https://www.acobrasil.org.br/site/wp-content/uploads/2024/07/Anuario_Completo_2024.pdf Accessed on January 2025.

[3] Carvalho Filho, P.A. – Escória de alto-forno – Arcellor Mitall https://brasil.arcelormittal.com/produtos-solucoes/coprodutos/coprodutos/escoria-alto-forno#:~:text=Devido%20ao%20seu%20grande%20potencial,fabrica%C3%A7%C3%A3o%20do%20cimento%20e%20concreto. Accessed on January 2025.

[4] Rawling R. D., Wu J. P., Boccaccini A. R. Glass-ceramic: The production from wastes – A review. Journal of Materials Science, 2006, 41, 733-761. doi.org/10.1007/s10853-006-6554-3.

[5] Fredericci C., Ziemath E., Zanotto E.D. Crystallization mechanism and properties of a blast furnace slag glass**.** Journal of Non-Crystalline Solids, 273, 1–3, 2000, 64-75. doi.org/10.1016/S0022-3093(00)00145-9

[6] Fredericci C., Pizani P. S., Morelli M. R. Crystallization of blast furnace slag glass melted in SnO_2 crucible J. Non-Cryst. Solids, 2007, 353, 406. doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2007.06.027

[7] Valderrama D.M.A, Cuaspud J.A.G, Roether J.A., Boccaccini. A.R. Development and characterization of glass ceramics from combinations of slag, fly ash, and glass cullet without adding nucleating agents. Materials, 12, 2019, 2032. doi:10.3390/ma12122032

[8] Li M., Zheng F., Xiao Y., Guan Y., Wang J., Zhen Q, et al. Utilization of residual heat to prepare high-performance foamed glass-ceramic from blast furnace slag and its reinforce mechanism. Process Safety and Environmental Protection, 156, 2021, 391-404. doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.019

[9] Ding L., Ning W, Wang Q., Shi D., Luo. Preparation and characterization of glass–ceramic foams from blast furnace slag and waste glass. Materials Letters, 141, 2015, 327-329. doi: 10.1016/j.matlet.2014.11.122

[10] Jia R., Deng L, Yun F., Li H. Zhang X. Jia X. Effects of SiO_2/CaO ratio on viscosity, structure, and mechanical properties of blast furnace slag glass ceramics. Materials Chemistry and Physics, 233, 2019, 155–162. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2019.05.065

[11] McMillan P.W. Glass-Ceramics, second ed., Academic Press: New York, 1979.

[12] https://www.reciclasampa.com.br/artigo/governo-federal-cria-sistema-nacional-para-reciclagem-de-vidro, accessed on January 2025.

[13] Zampelli, C. Panorama da Indústria Brasileira de Vidro – Associação Brasileira das Indústrias de Vidro – II Workshop Universidade/Indústria em Materiais Vítreos – São Carlos – SP, 2017, 1-21.

[14] Varshneya A.K., Mauro J.C. Fundamentals of Inorganic Glasses, 3rd edition, Elsevier, 2019.

[15] Fredericci C., Morelli M.R. - Corrosion of AZS and AZ crucibles in contact with a blast-furnace slag-based glass. Materials Research Bulletin 35, 2000, 2503–2514. doi.org/10.1016/S0025-5408(00)00462-1

[16] Marota A., Buri A., Branda F. Heterogeneous bulk nucleation and differential thermal analysis. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 21, 2, 1981, 227-233. doi.org/10.1007/bf01914205

[17] Zenebe C.G. A Review on the Role of Wollastonite Biomaterial in Bone Tissue Engineering. BioMed Research International, 2022, 1-15. doi.org/10.1155/2022/4996530

Capítulo 12

CAD e CAE em um curriculo contemporâneo - estudo da construção de aeronave – Fase I

Evandro Cardozo da Silva

Resumo: Usar CAD e CAE como principais ferramentas na formação de engenheiros pode ser um grande diferencial para renovar um currículo de engenharia mecânica que pouco se modificou em 40 anos. Como podemos pensar em IA, computação quântica, big data, e todas grandes evoluções, sem entender que um currículo contemporâneo como proposta de paradigma de curriculo de engenharia mecânica deve ser estudado. Para isso, CAD e CAE em vez de isolados como hoje, devem ser adotados em todas as fases de formação. O CAD como base para curso de engenharia mecânica e adotando ferramentas CAE como uma forma mais prática de aprender engenharia, reduzindo a dependência na matemática com seu uso extensivo domínio da análise de engenharia. Com CAD podemos usar e adotar como modelo prático em todas as disciplinas, das básicas até as profissionalizantes. Com o domínio de modelagem CAD 3D o uso do CAE deve buscar a qualidade e eficiência para resolver problemas de engenharia. Um projeto de uma aeronave é um exemplo de estudo para complementar conteúdos padrões na formação dos engenheiros com formação comum de engenharia mecânica (Aeroespacial, Naval, Automotiva, Ferroviária e Mecatrônica) do Departamento de Engenharias da Mobilidade. O método PBL, intensivamente empregado em vários programas de engenharia, e VP (protótipo virtual) que facilita o desenvolvimento de projeto de engenharia, são exemplificados na primeira fase de um projeto de construção da estrutura tubular de uma aeronave biposto biplano monomotor Acro Sport II definido apenas para fins educacionais.

Palavras-chave: Engenharia Mecânica, CAD, CAE, PBL, VP.

1. INTRODUÇÃO

Fernandes *et al.* (2020) afirmam que a educação é um dos principais agentes de transformação da sociedade, promovendo avanços científicos e tecnológicos e impulsionando negócios e economias no mundo inteiro ao citar artigo sobre educação de ensino superior asiático. Estes autores propõem resolver problemas com a assistência do computador no desenho (*Computer-Aided Design*-CAD), na engenharia (*Computer-Aided Engineering*-CAE) e na manufatura (*Computer-Aided Manufacturing*-CAM), adotando aprendizagem baseada em problemas (*Problem-based learning*-PBL) aplicado especificamente em um programa de graduação de engenharia mecânica. Este contexto é objeto deste trabalho, como Lee (2014), professor associado de universidade de Taiwan, descreve no prefácio de seu livro uma nova maneira de pensar o currículo de engenharia mecânica. Hoje o resultado da mudança estrutural na economia mundial está na mudança do eixo econômico do atlântico para o pacífico, na qual a China se destaca entre os asiáticos em função de grandes investimentos em educação e na formação de engenheiros. Como nosso maior parceiro comercial, é fundamental formar engenheiros em quantidade e qualidade, para tornar capital investido no Brasil formador de mão de obra com a melhoria do ensino de engenharia e o desenvolvimento de habilidades convergentes com a corrida digital.

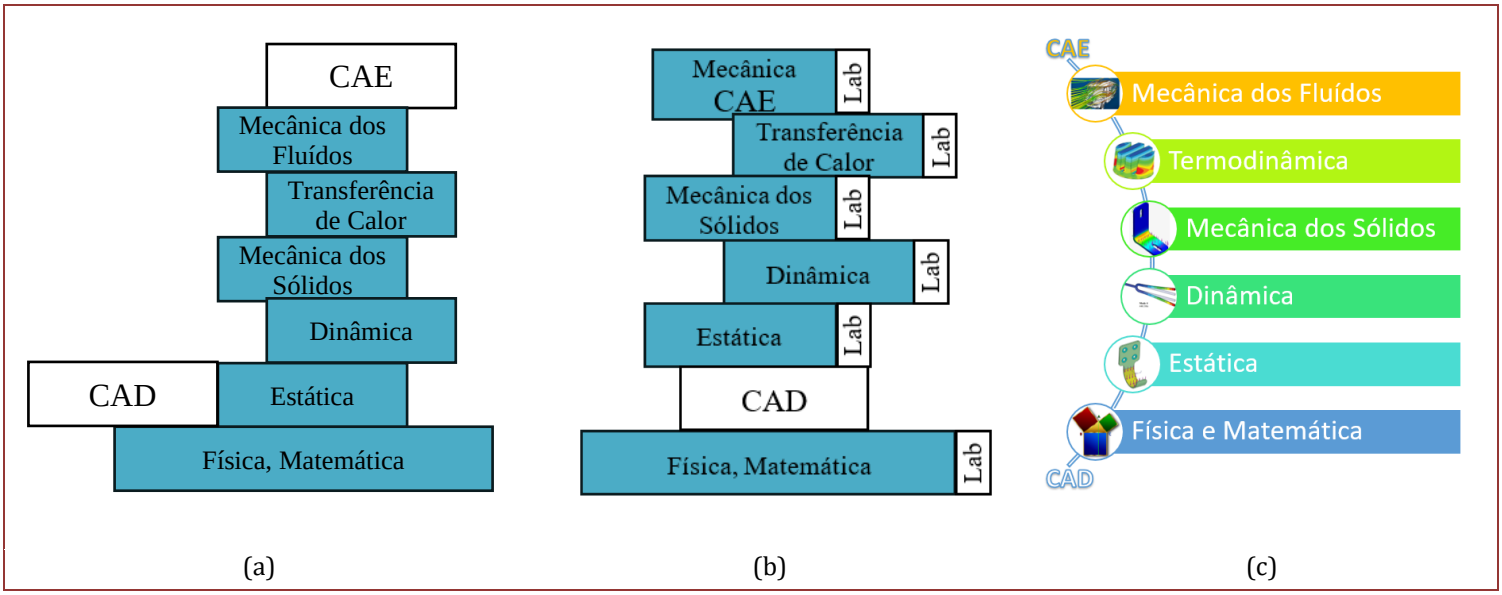
Num cenário de mudanças aceleradas de tecnologia as universidades devem preparar seus alunos e seus professores para um mercado de trabalho extremamente competitivo. Em cursos de engenharia as tecnologias transpassam seus laboratórios e devem refletir nas salas de aula com a maior proximidade do estado atual da arte quando se refere a implementar projetos de engenharia, que muito se respaldam no domínio de conteúdos com uso aprimorado de sistemas como CAD/CAE/CAM, resultado da revisão e modificação de seus currículos para uma engenharia moderna.

Pode parecer impossível construir seu próprio avião esportivo em casa ou na universidade. Mas, com os desenhos construtivos o objetivo deste trabalho tem proposta educacional detalhando o Acro Sport II, que é um biplano com envergadura pequena com trem de pouso convencional e é tipicamente construído com cockpit aberto e com carenagem no trem de pouso, está disponível no mercado a décadas (Poberezny e Rosman, 1982). O projeto disponível em desenho de construção em papel de prancheta (20 folhas no formato A2 e 2 folhas no formato A1) está sendo estudado aplicando os recursos gráficos digitais atuais (CAD) e ferramentas de simulação numérica (CAE).

2. REVISÃO DA LITERATURA

Uma forma de pensar na mudança de paradigma do currículo de engenharia mecânica visto por Lee (2014) que a matemática não é a única maneira apresentar conceitos de engenharia, mas o uso de ferramentas CAE é uma alternativa. Os conteúdos vistos a mais de 40 anos são essencialmente os mesmos, e, o que diferencia o currículo atual é o CAD e CAE que aparecem isolados na primeira e nas últimas fases, respectivamente (Figura 1a). A proposta é a plataforma programa CAE deve ser escolhido para atender como laboratório virtual das disciplinas de um currículo de engenharia mecânica contemporâneo (Figura 1b). O objetivo deste projeto é atender a um currículo de engenharia, convertendo o projeto de uma aeronave com os recursos de um programa CAD (SolidWork®-SW), líder de mercado e adotado pela maioria das escolas técnicas e universidades, analisando e aprimorando com o uso dos recursos de CAE (Figura 1c).

Figura 1 –Paradigma de um Currículo de Engenharia Mecânica: (a) convencional, (b) proposto por Lee (2014) e (c) proposto pelo autor (2024)

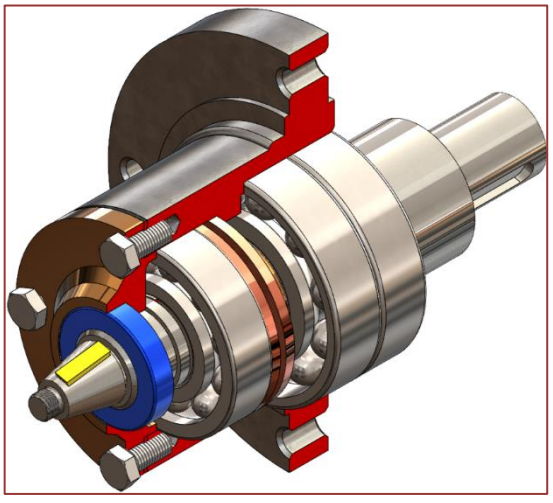


(a) (b) (c)

Fonte: Autor (2024).

A modelagem em um sistema CAD é muito importante e indispensável na formação do engenheiro mecânico. Segundo Gurusamy (2023), está no projeto e inovação em que o engenheiro pode gerar, visualizar e interagir no projeto de produtos usando a modelagem CAD em um sistema um ambiente virtual: os modelos CAD fornecem aos usuários a oportunidade de ver um produto antes mesmo de ser fabricado; os engenheiros podem simular e testar versões digitais de elementos de projetos que foram criados usando modelos CAD antes de criar protótipos físicos; máquinas e mecanismos possuem peças de geometria complexa que podem ser precisamente modeladas por engenheiros em um programa CAD; engenheiros mecânicos podem simular a montagem de várias peças em um programa CAD (Figura 2).

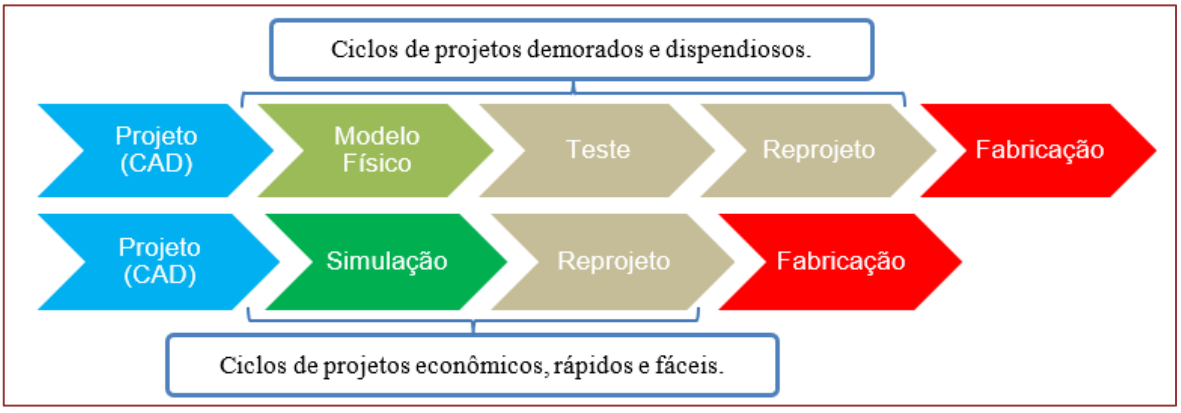
Figura 2. Exemplo de modelo de conjunto montado em um programa CAD (SolidWorks®)



Fonte: Adaptado de Apiluluelo *et al.* (2005).

Com a ajuda da ferramenta CAE, os engenheiros podem criar protótipos virtuais (*Virtual Prototype*-VP) de produtos. O modelo geométrico do produto a ser analisado, é elaborado em um *software* CAD que os sistemas CAE importam. A plataforma de *software* CAE é um ambiente de simulação para testar projetos de produtos com parâmetros de durabilidade, resposta dinâmica, calor e pressão e dinâmica dos fluídos. Sem a necessidade de protótipos físicos antes de fabricar o produto, a simulação diminui os custos e acelera a colocação do produto no mercado com melhor qualidade, produtos mais competitivos e segurança (Figura 3).

Figura 3. Desenvolvimento de projeto com simulação



Fonte: Adaptado de Churazova (2023).

Kaushik (2020) adota PBL avaliando o primeiro ano de um curso de engenharia buscando desenvolver em disciplina específica denominada Exploração de Engenharia. Os resultados são baseados em os principais conceitos do curso que são predominantemente ministrados usando uma abordagem instrucional de aprendizagem baseada em atividades. Detalhes da interação de roteiros de atividades mostra o mapeamento dos resultados das atividades com os elementos de concepção do projeto e práticas de ensino do padrão ouro PBL.

Lee (2014) define, em seu livro de prática de laboratório de computador para completar livro texto, especificamente do curso de Resistência de Materiais, que exige muito esforço na elaboração e implementação que atenda a o paradigma proposto (Figura 1b). No sentido de modernizar a graduação de engenharia, o resultado do programa Brasil – USA relacionado Leiva *et al.* (2021) destaca-se o objetivo da criação de ambiente propício para o desenvolvimento do pensamento criativo, com sólida base teórica, da capacidade de inovação e de empreendedorismo e o objetivo da geração de modelos inspiradores de currículos, de metodologias de ensino-aprendizagem e de gestão de cursos de graduação, que possam ser aplicados no sistema de ensino superior brasileiro. Das 50 propostas do programa são selecionados o Programa Institucional de Modernização (PIM) como articulador de ações para inovação, integração e internacionalização implementado pela Unisinos; o resultado do PIM da Engenharia Elétrica da UNIFEI na implementação do projeto pedagógico do curso (PPC) com apresentando as competências do perfil do engenheiro eletrônico da Unifei e adoção de metodologias ativas em novo currículo; o mesmo acontece no PIM da Engenharia de Controle e Automação da PUCPR que executa propostas inovadoras de Projetos Pedagógicos de Cursos da Escola Politécnica, com

matrizes curriculares com formação por competências e uso intensivo de metodologias ativas de aprendizagem. Mais 5 planejamentos podem ser encontrados nos capítulos organizados por Leiva *et al.* (2021).

Fernandes *et al.* (2020) relatam a experiência de ensino da PBL em curso de engenharia mecânica aplicando CAD/CAE/CAM para resolver problema de engenharia adotando aprendizagem ativa (PBL). Citam que a Aprendizagem Baseada em Problemas Orientada por Projetos (*Problem-Based Learning Project-Oriented* – PoPBL), tornou-se uma das estratégias de aprendizagem centrada no aluno mais utilizadas no ensino de engenharia. PBL é um método instrucional de aprendizagem ativa, que aplicado em um currículo ou em disciplina, exige avaliação por um processo dinâmico que precisa estar a serviço dos processos de ensino e aprendizagem e pode ter um impacto diferenciado na aprendizagem dos estudantes de engenharia (Elmôr Filho, 2019). Este projeto deve implementar esta metodologia com fundamentos da modelagem CAD/CAE apresentada.

3. MODELAGEM CAD

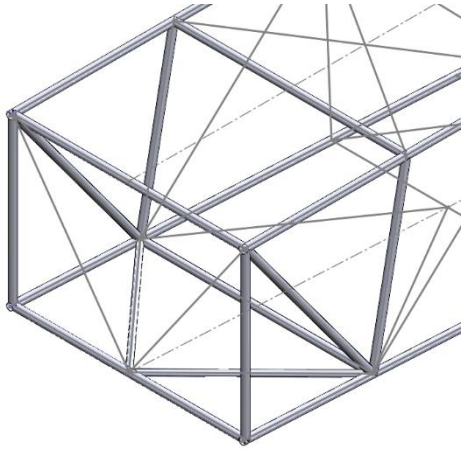
O projeto em desenvolvimento (Fase I – Estrutura da Fuselagem), modela geometrias complexas de sistemas mecânicos de um modelo de desenho construtivo de uma aeronave denominada ACRO-II (Poberezny e Rosman, 1982). O CAD SW, tem os recursos para modelar a estrutura tubular soldada, peças soldadas e chapas metálicas essenciais para as especificações para engenharia e manufatura.

3.1. TUBULAÇÕES

Fuselagem é a camada de proteção exterior da estrutura de uma aeronave, do tipo de casco ou de viga armada. A fuselagem de viga armada é usada em aviões leves. Consiste de uma estrutura de tubos ou treliça de aço soldados em séries de quadros. É parte do avião onde são presas as asas, serve para alojar os tripulantes, cargas e controles, além do motor. Sua estrutura tubular (aço cromo-molibdênio - 4130), soldada com tecnologia GTAW, juntamente com as cavernas e seu revestimento em material composto são responsáveis por absorver e distribuir os diversos esforços sofridos.

Para rodar adequadamente o programa CAE (SolidWorks® *Simulation*), é preciso definir com o recurso CAD de esboço 3D aplicando seções transversais distintas com o uso de Ferramentas de Estrutura (SW). A estrutura é resultado dos eixos dos perfis usando esboço espacial 3D (Figura 4a). O esqueleto de soldagem é obtido na definição de quadros das estações da fuselagem da aeronave em planos e suas ligações por longarinas e membros diagonais. O perfil do conjunto das peças soldadas é definido pelo esboço do perfil comercializado e aplicado no modelo ACRO-II (Figura 4b).

Figura 4. Estrutura da fuselagem de viga armada: (a) esqueleto e quadro e (b) perfis tubulares aplicados



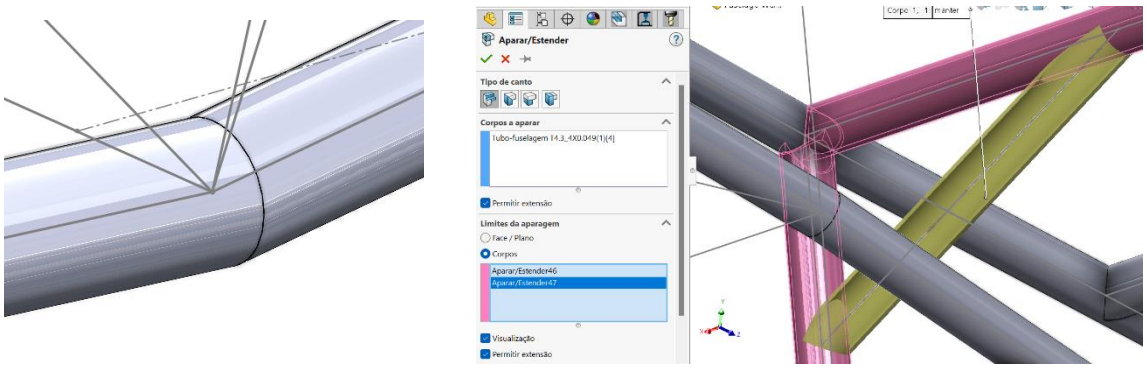
TUBO	4130 Tubulação de Aço Mecânico sem Costura (diâmetro externo x espessura da parede)
1	1/2” x 0,035”
2	5/8” x 0,035”
3	3/4” x 0,035”
4	3/4” x 0,049”
5	7/8” x 0,049”
6	3/4” x 0,058”

(a) (b)

Fonte: Autor (2023) e Poberezny e Rosman (1982).

Após inserir os membros estruturais com perfis redondos, o recorte dos membros estruturais é em geral automático (Figura 5a) e manualmente para atender necessidades específicas (Figura 5b). A fuselagem pode apresentar estrutura complexa com infinidade de tubos que devem ser recortados e formar uma estrutura soldada estável.

Figura 5. Recorte de membros estruturais: (a) automaticamente e (b) de forma manual



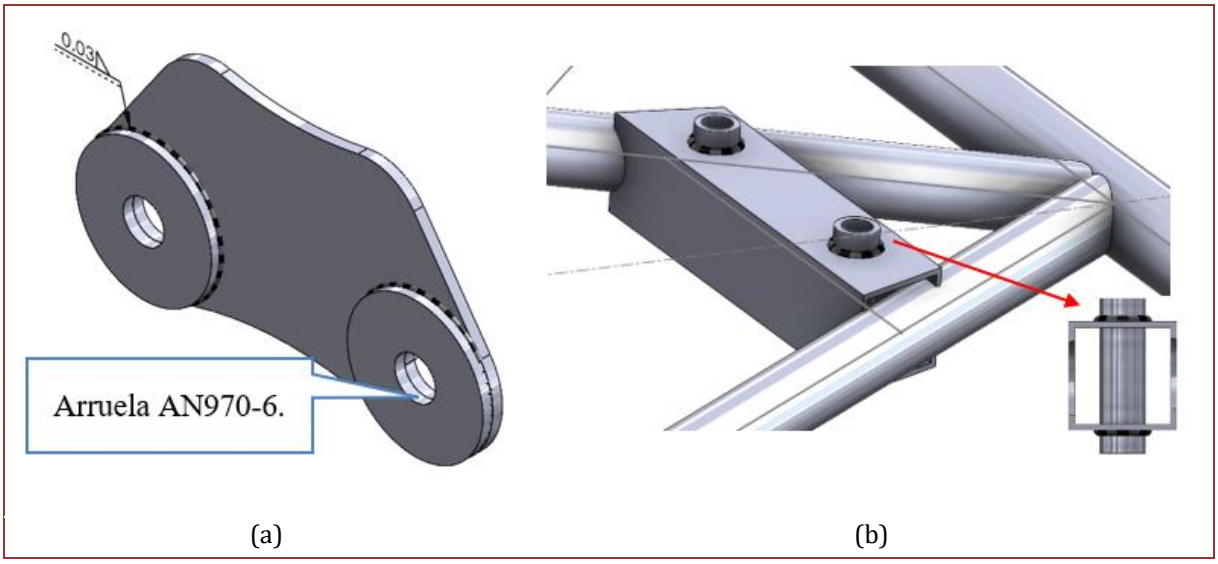
(a) (b)

Fonte: Autor (2023).

3.2. SOLDAGEM

Elementos da estrutura da fuselagem soldados podem ser combinados como objetos individuais 3D e recursos de uma modelagem de uma montagem soldada. Como exemplo está o suporte do trem de pouso (Figura 6a) de aço estrutural 4130 também usado na estrutura tubular, com arruelas AN970-6 (padrão aeronáutico) de aço banhado a cádmio. O tubo de torque de base de mancal dianteiro (Figura 6b) com buchas soldadas.

Figura 6. Elementos da fuselagem soldados: (a) suporte do trem de pouso e (b) tubo de torque



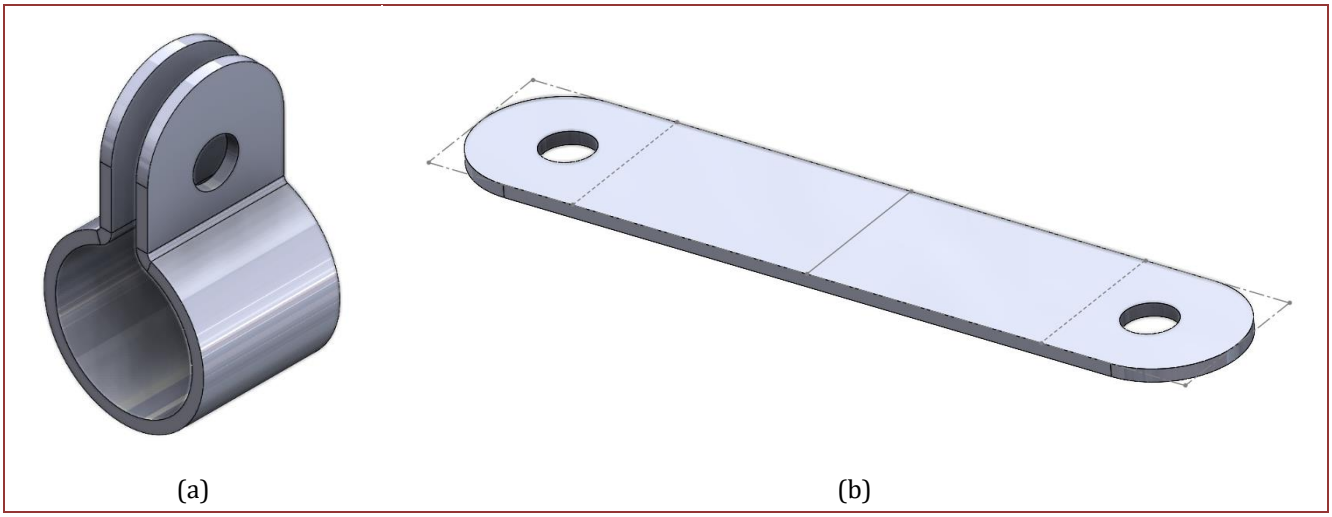
(a) (b)

Fonte: Autor (2023).

3.3. CHAPAS METÁLICAS

Peças de chapas metálicas possuem vantagens em relação a peças simples para criar modelos que podem ser planificados e fabricados por estampagem e para projetos de aeronaves podem torná-las mais leves. Na aeronave modelada, com recurso do CAD SW, a ferramenta Chapa Metálica permite criar, como exemplo, a peça de encaixe de fixação do cinto de segurança (Figura 7a) a ser montada sobre uma longarina, tendo a forma planificada com linhas de dobras mostrada em perspectiva (Figura 7b). Com as dimensões de 4”x3/4” com chapa de aço 4130 requer espessura de 0,063 polegadas.

Figura 7. Encaixe de cinto de segurança de chapa metálica: (a) dobrado e (b) planificado



(a) (b)

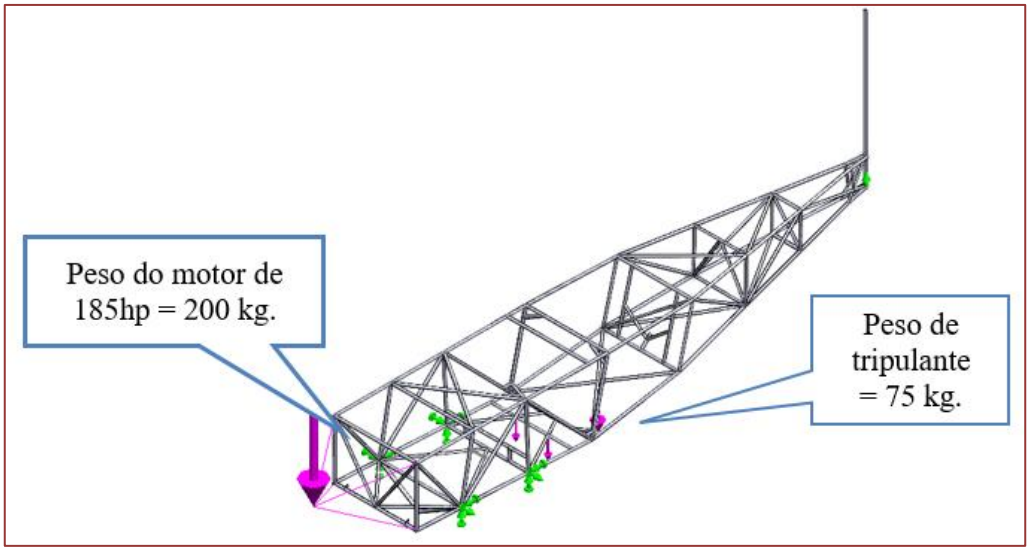
Fonte: Autor (2023).

4. MODELAGEM CAE

As técnicas de simulação CAE podem ser realizadas principalmente pela Análise de Elementos Finitos (*Finite Element Analysis* – FEA). Com o modelo CAD podemos optar na análise de projeto CAE na solução estática, fadiga e dinâmica (movimento).

Neste trabalho a análise FEA da fuselagem do ACRO-II (Figura 4) usando as tecnologias CAD (SW) e CAE (SW Simulation) integrado. O material da estrutura tubular é o aço liga AISI 4130, com: módulo de elasticidade (E) = 205 GPa, Coeficiente de Poisson (μ) = 0,285 e a densidade (γ) = 7,85 kg/cm^3. O formato utilizado como seção para o projeto ACRO-II é um perfil tubular (Figura 4b). As condições de vínculos se restringem a engaste em 4 pontos de montagem do trem de pouso e restrição na vertical do apoio do trem traseiro. Para o estudo dos modos de vibração se adota um modelo elástico sem apoio. É considerado um motor de propulsão (185hp) do ACRO-II com cerca de 200 kg. Os dois tripulantes pesam cada um 75 kg. O modelo CAE (Figura 8) tem a estrutura tubular treliçada com aplicação de vínculos, carregamento aplicado na junta do elemento de viga| e carregamento do tipo remoto com conexão distribuída ao primeiro quadro.

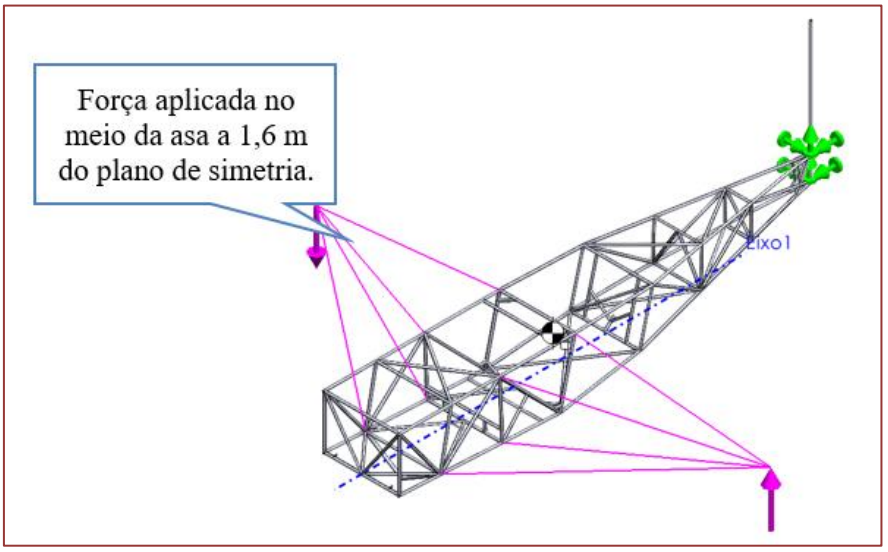
Figura 8. Estrutura tubular: condições de contorno e carregamento (motor=200kg, 2 tripulantes =150kg)



Fonte: Autor (2024).

Com facilidade é possível determinar a rigidez torcional da fuselagem com a aplicação de um torque carregamento do tipo remoto com conexão distribuída nas juntas de fixação das asas, definida a carga na posição central da asa, mais a metade da largura de um quadro (50”+13”=63”=1,6m) e engastada a traseira da fuselagem (Figura 9).

Figura 9. Estrutura tubular: condições de contorno e carregamento



Fonte: Autor (2024).

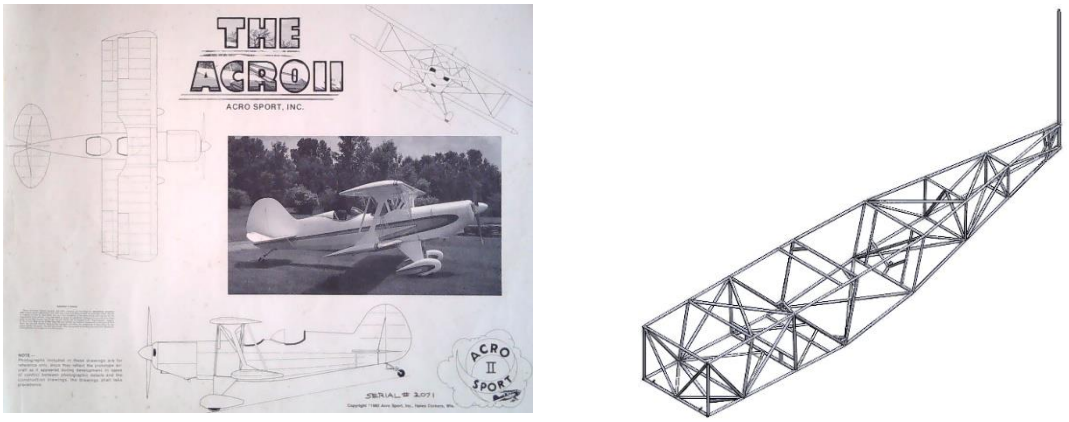
O recurso CAE (SW *Simulation*) permite a análise de frequência, para calcular as frequências de ressonância e seus modos de vibração associados. No estudo de frequência, para os modos de vibração de um modelo elástico sem restrições, devem ser considerados os 6 primeiros modos como de corpo rígido, necessitando definir o número de frequências para análise como 12 para obter 6 modos elásticos.

5. RESULTADOS

5.1. PROJETO CAD

O projeto em CAD é a fuselagem formada pelos elementos estruturais soldados (tubos redondos), que são adicionados a linhas de esboços 2D e 3D. Consequentemente, definem com recortes (Figura 5) a fuselagem tipo treliça de tubos de aço soldados da aeronave de acrobacia ACRO-II (Poberezny e Rosman, 1982) com desenhos de construção (Figura 10a) representados no CAD SW (Figura 10b).

Figura 10. Estrutura tubular do ACRO-II: (a) projeto original e (b) modelo CAD SW

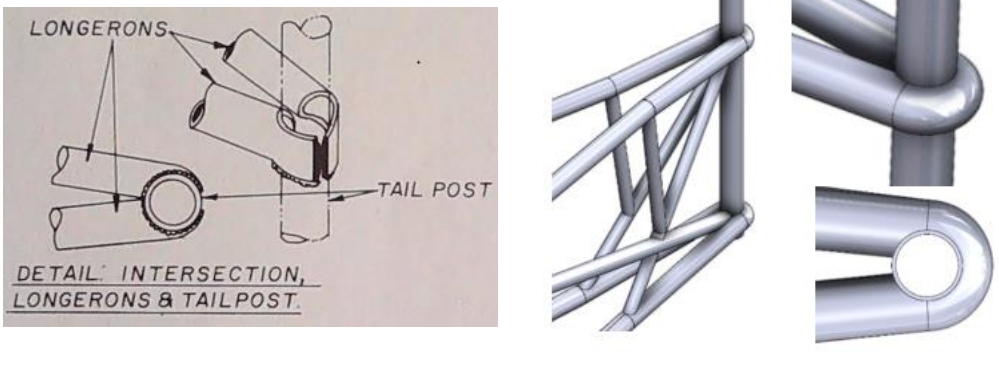


(a) (b)

Fonte: Poberezny e Rosman (1982) e Autor (2023).

Com os recursos de CAD SW, Soldagens (conjunto de peças soldadas), temos um ambiente de acesso a uma quantidade de ferramentas e capacidades especializadas. Portanto, soluções para uma geometria complexa de uma estrutura tubular como de uma aeronave, é possível. O trabalho do projeto de prancheta detalhado em formatos A2, voltados para a construção de aeronave de acrobacia ACRO-II, apresentam detalhes construtivos que podem ser melhorados com o recurso do CAD. O posicionamento do tubo traseiro por solda ponto (Figura 11a), nivelado verticalmente e soldado, pode ter um resultado mais prático, de maior rigidez, seguro e estável, definindo o fechamento de dois níveis da fuselagem com os extremos arrematados por curva (Figura 11b).

Figura 11. Estrutura tubular do ACRO-II: (a) interseção longarina tubo da cauda e (b) solução CAD SW



(a) (b)

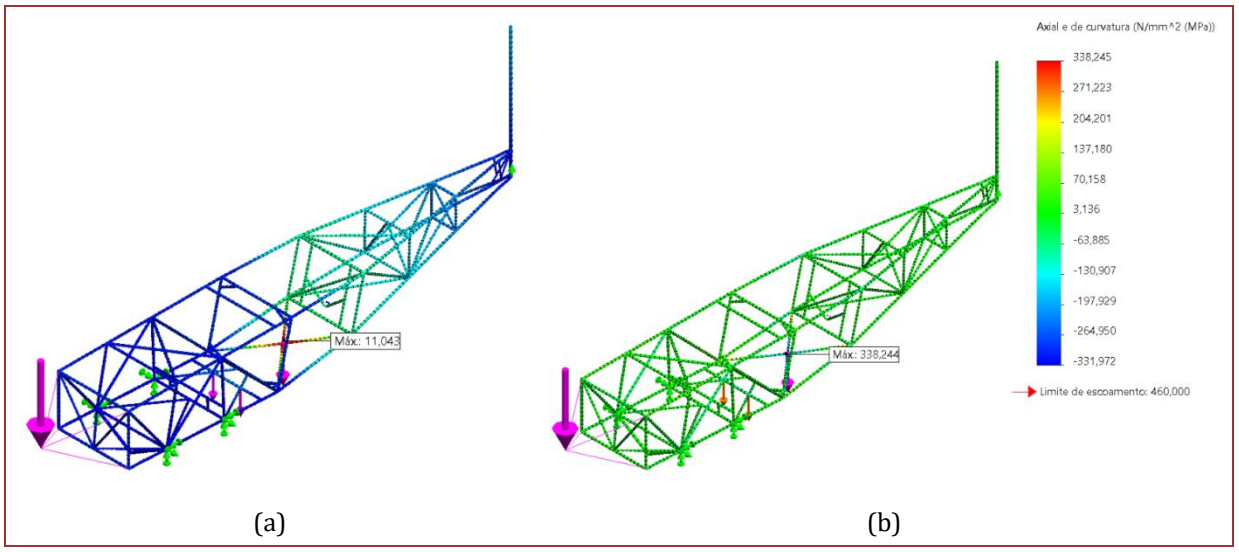
Fonte: Poberezny e Rosman (1982) e Autor (2023).

5.2. PROJETO CAE

O objetivo é realizar uma análise FEA na estrutura tubular do modelo da fuselagem soldada do modelo de aeronave ACRO-II (Figura 10b). A criação da malha padrão é feita

com elementos de viga que transmitem forças axiais nodais. São criadas 90 juntas (ou extremos de vigas) que recebem as condições de contorno e carregamentos (Figura 8) para a análise estática com resultado da deflexão (Figura 12a), tensão axial (Figura 12b) e momento fletor (Figura 13).

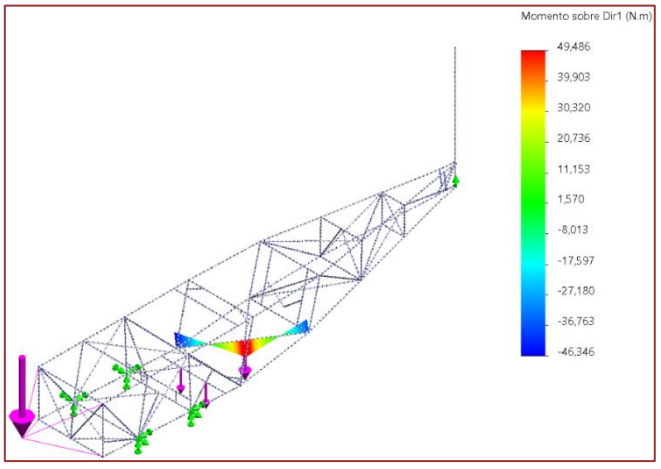
Figura 12. Resultados da simulação da estrutura tubular: (a) deflexão (mm) e (b) tensão axial (MPa)



(a) (b)

Fonte: Autor (2024).

Figura 13. Resultados da simulação da estrutura tubular do ACRO-II: momento de fletor (N.m)

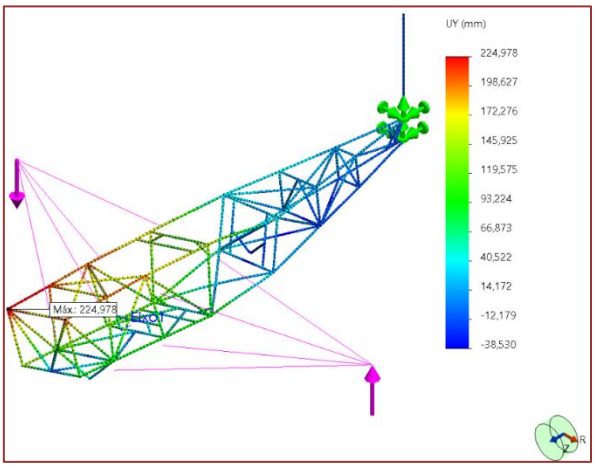


Fonte: Autor (2024).

A determinação da resistência a torção da fuselagem com as condições de contorno e aplicação de carga (Figura 9), considerando a estrutura soldada como rígida, se deve a carga de 500N aplicada na linha do centro de massa da fuselagem e o ponto médio da asa de 100”. O resultado da deflexão (Figura 14) é definido em coordenadas cilíndricas, para

medir a deformação angular da fuselagem necessária para calcular a rigidez torcional (200Nm/grau) da fuselagem.

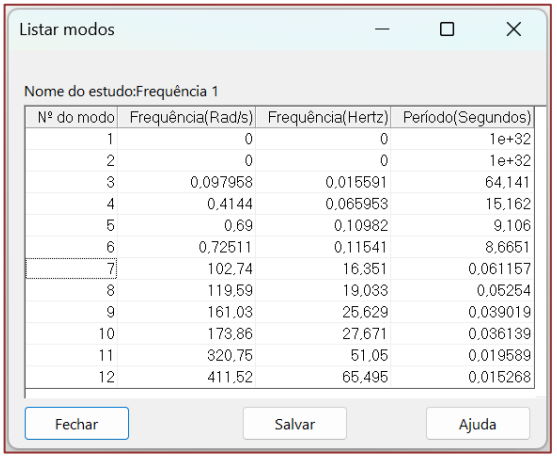
Figura 14. Resultados da simulação da estrutura tubular do ACRO-II: deflexão (mm)



Fonte: Autor (2024).

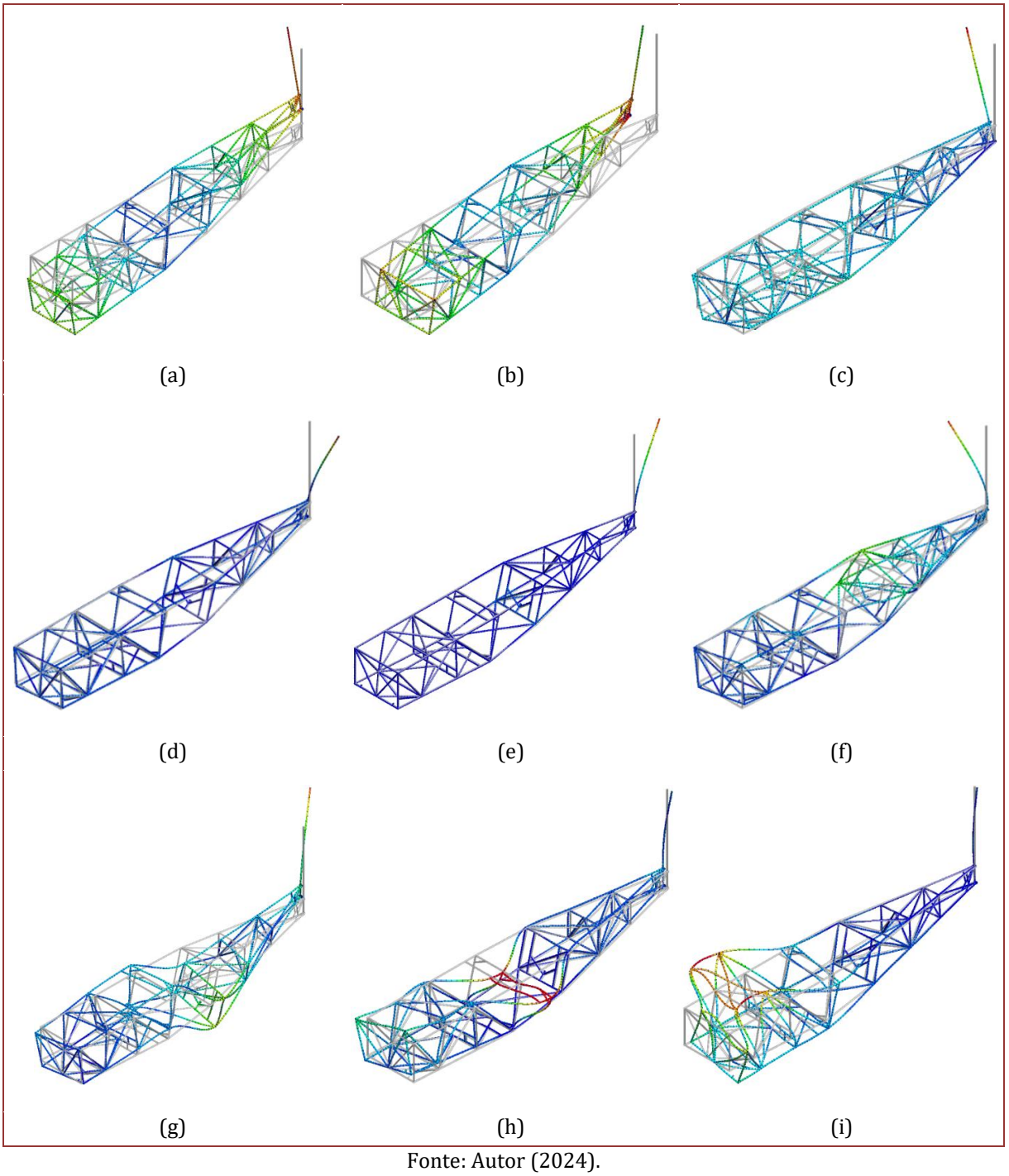
Os resultados para a análise modal CAE em condição de contorno livre do modelo desenvolvido, tem na janela do CAD da lista de modos (Figura 15), os modos de 1 até 6 são os modos de corpo rígido com frequência igual ou muito próxima de 0Hz. Os modos 7 até 12 são os modos elásticos mostrados na Figura 16. Podem ser identificados os primeiros modos de vibração: de flexão (Figura 16a), de flexão lateral (Figura 16b) e de torção (Figura 16c). Em uma simulação modal o deslocamento é ilustrativo. Serve como informação de forma de vibrar e não como intensidade de deslocamento.

Figura 15. Janela da lista de modos de vibração da estrutura tubular do ACRO-II



Fonte: Autor (2024).

Figura 16. Modos de vibração da estrutura tubular do ACRO-II



Fonte: Autor (2024).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em cada semestre temos que nos preparar para trazer informações precisas sobre a formação de engenheiros que se modificam aceleradamente, como: conscientizar os alunos da importância do conhecimento em programação em linguagem, como Python, na sua formação; entender conceitos básicos de mecânica quântica com o avanço dos Computadores Quânticos, computação quântica e disciplinas como Cálculo Numérico Quântico. Esta preparação ocorre pela motivação da leitura básica de literatura nacional

e estrangeira. E, urgentemente, se preparar para uso adequado da IA em um cenário de adoção desta ferramenta com eficiência e inovação na engenharia.

A experiência de introduzir o CAD na primeira fase dos cursos do Departamento de Engenharias da Mobilidade com base comum de currículo de engenharia mecânica, cria uma grande expectativa e motivação em aprender engenharia sem dependência de disciplinas que muito reprovam, como o Cálculo Diferencial e Integral (CDI). Este processo pode ajudar no desempenho dos alunos, reduzindo a evasão e gerando uma habilidade indispensável na formação do engenheiro. A matemática é muito importante em mostrar conceitos de engenharia e para explicar fórmulas nos princípios da física clássica, porém, uma alternativa defendida é o uso da engenharia simultânea aplicada na formação do engenheiro com ferramentas gráficas CAE que reduz a dependência do CDI com multidisciplinaridade da adoção do recurso computacional. Para a redução da evasão de cursos de engenharia está na mudança didática-cultural de professores, principalmente nas primeiras fases de formação básica, adotando ferramentas CAD, além de gráficas de matemática, para ensinar a aplicar CDI em conceitos práticos de engenharia o que pode ser verificado em todo o currículo.

Formar engenheiros representa reconhecer as demandas de mercado de trabalho e saber usar recursos de aprendizagem ativa na educação em engenharia onde podemos destacar o método instrucional PBL. O futuro do trabalho está se formatando conforme as mudanças tecnológicas, como a IA e a evolução para um futuro de energia verde, e com a escassez de talentos. Um exemplo da eficiência e inovação na IA aplicada é o que atualmente se constata no exemplo da interação do ChatGPT da OpenAI com a ferramenta CAD SolidWorks®. Esta combinação pode mudar a engenharia, dando condições de engenheiros a criar e produzir de forma nunca vista antes.

Este projeto é um breve e um embrionário momento de reflexão, que anos de prática e constante busca de aprimoramento do estado da arte do ensino técnico e científico. Ao fundamentar o planejamento de aulas dinâmicas com CAD/CAE e PBL na aprendizagem ativa com ferramentas como SolidWorks® e assistência da IA (Krahe et al., 2019), reconhecemos que a educação de nossos engenheiros é crítica para o futuro de nosso país. Como os projetos de engenharia dificilmente seriam reproduzidos no papel, os recursos gráficos computacionais devem usar os melhores métodos instrucionais disponíveis e serem aplicados com eficiência. A continuidade do projeto está na dedicação do docente em implementar todo o projeto disponível do desenho construtivo da aeronave ACRO-II (Poberezny e Rosman, 1982), completando detalhes da fuselagem, definido sistemas de controle, trem de pouso, grupo cauda, seção transversal da asa, costela da asa, asa superior e inferior, ailerons, montagem do motor, tanque de combustível, parede de fogo, carenagens e placas.

A formação de engenheiros deve ser constantemente aprimorada o que demanda grande empenho das universidades e dos professores que são os principais mentores destas aceleradas evoluções de programas para a engenharia. E a missão é buscar sempre adequar currículos a conteúdos que se modificam rapidamente com o avanço da tecnologia.

REFERÊNCIAS

[1] APILLUELO, Auria et al. **Dibujo industrial. Conjuntos y despieces: conjuntos y despieces**. Ediciones Paraninfo, SA, 2005.

[2] CHURAZOVA, A. **How Virtual Prototyping Can Benefit Your Product Design Process**. Disponível em: https://www.simscale.com/blog/virtual-prototyping-benefit/. Acessado em: 10 jan. 2024.

[3] ELMÔR FILHO, Gabriel *et al.* **Uma nova sala de aula é possível: aprendizagem ativa na educação em engenharia.** 1. ed. – Rio de Janeiro: LTC, 2019.

[4] FERNANDES, Fábio AO *et al*. **Integrating CAD/CAE/CAM in engineering curricula: A project-based learning approach.** Education Sciences, Vol. 10, No. 5, pp. 125, 2020.

[5] GURUSAMY, T. **Importance of CAD Modeling for Mechanical Engineers**. Disponível em: https://www.linkedin.com/pulse/importance-cad-modeling-mechanical-engineers-gurusamy. Acessado em: 09 dez. 2023.

[6] KRAHE, Carmen *et al*. "AI-based Computer Aided Engineering for automated product design-A first approach with a Multi-View based classification". Procedia CIRP, Vol. 86, pp. 104-109, 2019.

[7] LEE, Huei-Huang, 2014. "Mechanics of materials labs with SolidWorks Simulation 2014". USA, SDC Publications.

[8] LEIVA, Daniel Rodrigo; SEABRA, Antonio Carlos; OLIVEIRA, Vanderli Fava de. **Planejamento e primeiros resultados dos projetos institucionais de modernização da graduação em engenharia (2019/20).** Brasília: ABENGE, 2021.

[9] POBEREZNY, Paul H. e ROSMAN, Bill. **The Acro II**. Acro Sport Inc., Hales Corners, Wisconsin, USA. Serial no: 2071, 1982.

Capítulo 13

Órtese de monitoramento da região lombar

Ana Augusta de Carvalho Rangel
Lívian Cerqueira Mousinho Cordeiro de Sousa
Lucas de Sá Penaforte
Maria Beatriz da Costa Gonçalves
Mizael Cristino de Oliveira Queiroz
Alexandre Magnus Fernandes Guimarães

Resumo: A dor lombar é uma condição de saúde comum que afeta entre 65% e 84% das pessoas em algum momento da vida. Esta condição causa um impacto significativo nos serviços de saúde e na qualidade de vida, resultando em despesas médicas elevadas e perdas de produtividade no trabalho. Estudos projetam que, até 2050, haverá 843 milhões de pessoas com dores lombares no mundo. Fatores como postura inadequada, sedentarismo e condições ocupacionais desfavoráveis contribuem para a alta prevalência e impacto funcional da dor lombar. A ergonomia inadequada e posições estáticas prolongadas são alguns dos principais fatores de risco. Tecnologias de mapeamento da coluna lombar, que analisam a postura, podem ajudar na prevenção e reabilitação, reduzindo a prevalência e melhorando a qualidade de vida. A proposta de desenvolvimento de uma órtese para mapear a postura lombar e alertar sobre posturas incorretas é uma solução promissora.

Palavras-chave: Dor lombar, ergonomia, qualidade de vida, sistema embarcado.

1. INTRODUÇÃO

A dor lombar é definida como a dor localizada na região das costas, desde o nível da costela mais baixa até a prega glútea, com ou sem irradiação para as pernas (Casser; Seddigh; Rauschmann, 2016). É um problema de saúde altamente prevalente que afeta até 65% das pessoas anualmente e até 84% ao longo da vida. Esta condição, que apresenta uma prevalência pontual de aproximadamente 11,9% na população mundial, gera uma demanda significativa aos serviços de saúde, além de comprometer a qualidade de vida e a funcionalidade diária dos indivíduos (Nascimento; Costa, 2015).

Estudos projetam que, até 2050, o mundo terá 843 milhões de pessoas com lesões de dor lombar, conforme apontado pela The Lancet. No Brasil, entre 2012 e 2016, os custos associados ao manejo dessa condição chegaram a aproximadamente US$ 2,2 bilhões, e estima-se que ela tenha causado uma perda de 59 milhões de dias de trabalho no período. Dados norte-americanos indicam que os custos anuais relacionados à dor lombar atingem US$ 635 bilhões, somando despesas médicas diretas e perdas de produtividade no trabalho. Além disso, entre 2013 e 2018, o Sistema Único de Saúde (SUS) realizou 1.689 procedimentos cirúrgicos para tratar essa condição, totalizando um gasto de R$ 24,4 milhões, segundo informações do DATASUS.

A elevada prevalência e o impacto funcional da dor lombar frequentemente estão associados a fatores como postura inadequada, sedentarismo e condições ocupacionais desfavoráveis. Posições estáticas prolongadas e movimentos repetitivos aumentam o risco de sobrecarga na coluna lombar, favorecendo o surgimento de episódios agudos e a progressão para quadros crônicos. Além disso, o ambiente de trabalho desempenha um papel crucial, com a ergonomia inadequada sendo um dos principais fatores contribuintes para o aparecimento e a perpetuação da dor lombar (Camarotto; Simonelli; Rodrigues, 2013).

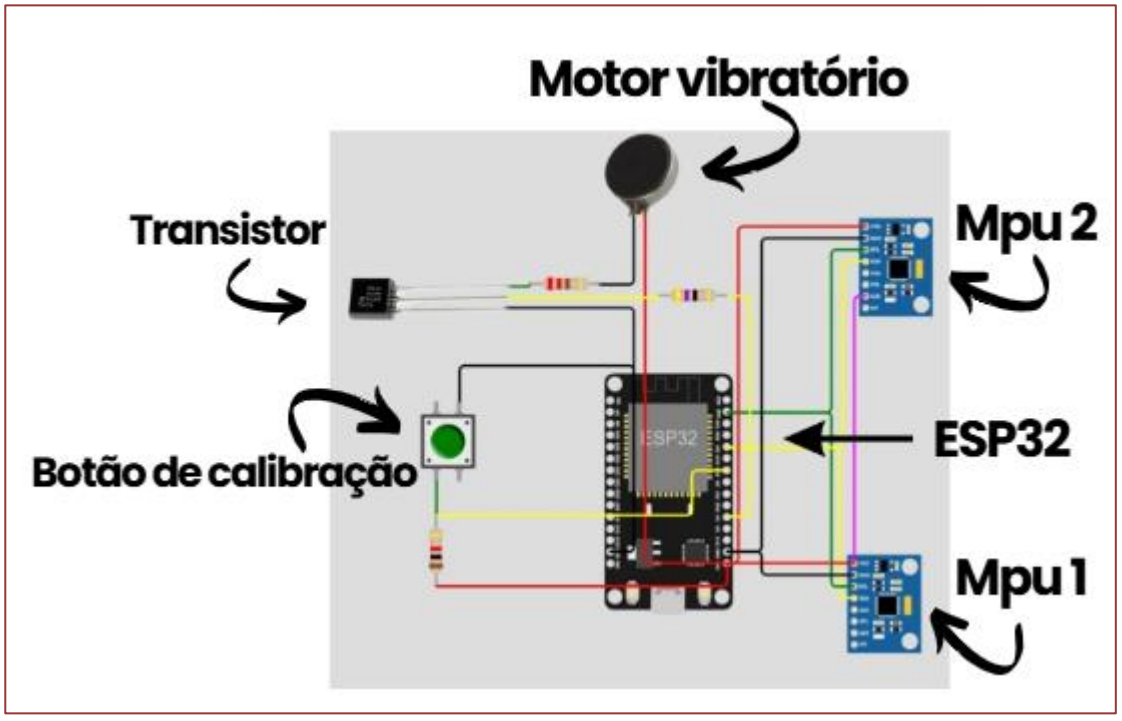
Nesse contexto, o mapeamento da coluna lombar se destaca como uma ferramenta promissora para abordar o problema de forma sistemática e individualizada. Tecnologias voltadas para a análise postural permitem identificar desequilíbrios musculoesqueléticos e padrões inadequados, que podem ser fatores precipitantes de episódios agudos de dor lombar. Ao integrar avaliação, prevenção e reabilitação, essas abordagens têm o potencial de reduzir a prevalência da dor lombar, melhorar a funcionalidade e promover uma melhor qualidade de vida para os indivíduos afetados. Dessa forma, este trabalho se propõe a desenvolver o protótipo de uma órteses que realizasse o mapeamento da postura da lombar, a fim de alertar posturas incorretas, evitando sobrecargas e lesões.

2. METODOLOGIA

2.1. COMPONENTES UTILIZADOS

Componentes	Especificações	Quantidade
Resistor	1 kΩ/ 220 Ω/ 47 Ω	1/1/1
Microcontrolador	ESP32	1
Sensor	MPU-6050	2
Atuador/Feedback	VIBRACALL	1
Botão	PUSHBUTTON	1
Transistor	2N2222	1

2.2. ESQUEMÁTICO DO PROTÓTIPO



2.3. CÓDIGO UTILIZADO

```
#include <Adafruit_MPU6050.h>
#include <Adafruit_Sensor.h>
#include <Wire.h>
// Criando um objeto Wire
TwoWire I2C_1 = TwoWire(0); // Barramento I2C 0
// Criando 2 sensores
Adafruit_MPU6050 mpu1, mpu2;
const int ledESP = 2;          // LED embutido do ESP32 (GPIO 2)
const int vibracallPin = 4;    // Pino do vibracall (motor vibratório)
const int calibrateButton = 18; // Pino do botão de calibragem
// Variáveis para armazenar os offsets de calibragem
float offsetTheta1 = 0;
float offsetTheta2 = 0;
// Variáveis de controle de tempo
unsigned long incorrectPostureStart = 0;
bool postureIncorrect = false;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  // Configurando os pinos do LED e do vibracall
  pinMode(ledESP, OUTPUT);
  pinMode(vibracallPin, OUTPUT);
  pinMode(calibrateButton, INPUT_PULLUP);
  // Inicializando o barramento I2C
  I2C_1.begin(21, 22); // Pinos SDA = 21, SCL = 22
  // Inicializando os sensores com endereços diferentes no mesmo barramento
  if (!mpu1.begin(0x68, &I2C_1)) {
    Serial.println("Falha ao inicializar o MPU1 (0x68)");
    while (1);
  }
  if (!mpu2.begin(0x69, &I2C_1)) {
    Serial.println("Falha ao inicializar o MPU2 (0x69)");
    while (1);
  }
  Serial.println("Inicialização dos sensores completa");
```

```
}
void calibrateSensors(sensors_event_t a1, sensors_event_t a2) {
  // Calculando os ângulos atuais para usar como referência
  offsetTheta1 = atan2(a1.acceleration.y, a1.acceleration.z) * 180 / PI;
  offsetTheta2 = atan2(a2.acceleration.y, a2.acceleration.z) * 180 / PI;
  Serial.println("Calibragem realizada!");
  Serial.print("Offset Sensor 1: ");
  Serial.print(offsetTheta1);
  Serial.println("°");
  Serial.print("Offset Sensor 2: ");
  Serial.print(offsetTheta2);
  Serial.println("°");
}
void checkPosture(sensors_event_t a1, sensors_event_t a2) {
  float threshold = 15.0; // Limite em graus para detecção de má postura
  // Calculando os ângulos corrigidos para cada sensor
  float theta1 = atan2(a1.acceleration.y, a1.acceleration.z) * 180 / PI - offsetTheta1;
  float theta2 = atan2(a2.acceleration.y, a2.acceleration.z) * 180 / PI - offsetTheta2;
  // Calculando a diferença angular
  float deltaTheta = abs(theta1 - theta2);
  // Verificando se a diferença excede o limite
  if (deltaTheta > threshold) {
    if (!postureIncorrect) {
      postureIncorrect = true;
      incorrectPostureStart = millis();
    }
    // Verifica se a postura incorreta persiste por mais de 8 segundos
    if (millis() - incorrectPostureStart >= 8000) {
      digitalWrite(ledESP, HIGH);        // Acende o LED embutido
      digitalWrite(vibracallPin, HIGH);  // Ativa o motor vibratório
      Serial.println("Postura incorreta por 8 segundos!");
    }
  } else {
    postureIncorrect = false;
    digitalWrite(ledESP, LOW);         // Apaga o LED embutido
```

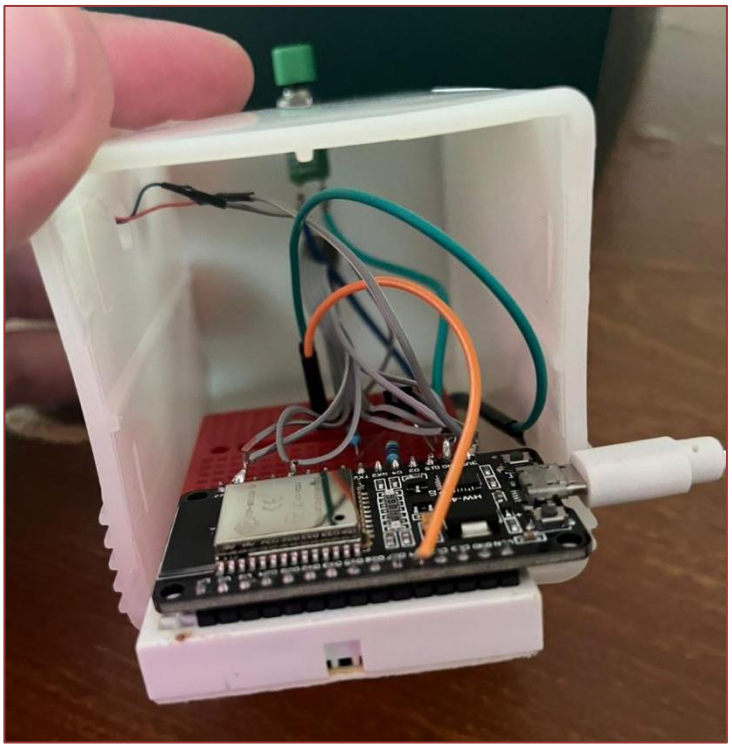
```
    digitalWrite(vibracallPin, LOW);   // Desliga o motor vibratório
    Serial.println("Postura correta!");
  }
  // Exibindo os resultados
  Serial.print("Ângulo Sensor 1 (ajustado): ");
  Serial.print(theta1);
  Serial.print("°, Ângulo Sensor 2 (ajustado): ");
  Serial.print(theta2);
  Serial.print("°, Diferença: ");
  Serial.print(deltaTheta);
  Serial.println("°");
}
void loop() {
  sensors_event_t a1, g1, temp1;
  sensors_event_t a2, g2, temp2;
  // Lendo dados do Sensor 1
  mpu1.getEvent(&a1, &g1, &temp1);
  // Lendo dados do Sensor 2
  mpu2.getEvent(&a2, &g2, &temp2);
  // Verificando se o botão foi pressionado para calibragem
  if (digitalRead(calibrateButton) == LOW) {
    calibrateSensors(a1, a2); // Realiza a calibragem
    delay(500); // Pequeno atraso para evitar múltiplas leituras do botão
  }
  // Verifica a postura e aciona o LED e o vibracall se necessário
  checkPosture(a1, a2);
  // Pequeno delay
  delay(1000);
}
```

2.4. FUNCIONAMENTO

O código implementa um sistema de monitoramento de postura utilizando dois sensores MPU6050, que medem a aceleração em três eixos. Ele verifica se há desalinhamento postural ao calcular a diferença angular entre os dois sensores e fornece feedback visual com um LED e tátil por meio de um motor vibratório (*vibracall*).

Primeiramente, os sensores são configurados no barramento I2C, diferenciados pelos endereços 0x68 e 0x69. Um botão no pino 14 permite realizar a calibragem, definindo os ângulos iniciais como referência para as medições subsequentes. O LED conectado ao pino 13 acende caso a postura esteja incorreta. Durante a inicialização, os sensores são ativados e selecionados, e qualquer falha na conexão resulta em uma interrupção do código com uma mensagem de erro.

Durante a execução, os sensores capturam dados de aceleração em tempo real. Os ângulos de inclinação são calculados para cada sensor com base nos eixos Y e Z, e os valores são corrigidos usando os offsets obtidos na calibragem. Se a diferença entre os ângulos exceder um limite pré-definido de 15 graus e essa má postura persistir por mais de 8 segundos. Se excedido, a postura é considerada incorreta, acionando o LED e o motor vibratório para alertar o usuário, caso contrário, eles permanecem desligados. O programa exibe os ângulos calculados, ajustados e a diferença angular no monitor serial. Esse ciclo é controlado por pequenos atrasos para estabilizar as leituras e evitar múltiplas detecções do botão de calibragem.



3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes realizados com o protótipo permitiram simular diferentes ângulos de orientação da coluna lombar, utilizando dois sensores MPU6050 posicionados nas vértebras L1 e L5. Durante as simulações, o sistema demonstrou-se funcional ao calcular os ângulos de orientação em tempo real e detectar desvios superiores ao limite previsto de 15°. Sempre que a diferença angular entre os sensores excedeu esse limite, o protótipo acionou o LED embutido e o motor vibratório, alertando sobre a má postura. Esses resultados indicam que o sistema é eficaz no mapeamento da orientação da coluna lombar, fornecendo

feedback imediato para a correção postural e contribuindo para a prevenção de problemas associados à má postura.

3.1. DESEMPENHO E LIMITAÇÕES

Apesar do sucesso inicial, algumas limitações foram observadas durante os testes. A quantidade de sensores utilizada (dois) pode ser insuficiente para medir com alta precisão a curvatura total da coluna lombar. Esse fator pode impactar o desempenho do sistema em situações mais complexas, como a identificação de desvios em diferentes pontos ao longo da coluna. Planeja-se a inclusão de mais sensores em versões futuras do protótipo para aumentar a precisão e o detalhamento das medições.

Outro aspecto relevante foi a adição de um botão para calibragem da "posição zero" da coluna. Essa funcionalidade mostrou-se essencial para adaptar o dispositivo às variações individuais, aumentando sua aplicabilidade em diferentes usuários.

3.2. COMPARAÇÃO COM TRABALHOS PRECEDENTES

Comparado a trabalhos anteriores que utilizam maior quantidade de sensores para mapear a coluna inteira, este protótipo apresenta uma abordagem mais focada na região lombar. A escolha por utilizar apenas dois sensores resultou em um sistema mais simples e com custo reduzido, alinhado aos objetivos de desenvolver uma solução acessível e prática.

3.3. IMPACTO E APLICABILIDADE

O dispositivo mostrou-se promissor para a prevenção da dor lombar ao contribuir para a melhoria da postura durante o dia a dia. A possibilidade de aplicação em ambientes laborais, especialmente quando associado a órteses passivas, representa um avanço significativo na ergonomia e na promoção da saúde ocupacional. A simplicidade do sistema e o feedback visual ou vibratório tornam o protótipo adequado para uso em diferentes cenários.

3.4. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar a funcionalidade do dispositivo e ampliar suas aplicações, algumas melhorias estão sendo consideradas. Uma delas é a adição de mais um sensor, o que permitirá aumentar a precisão das medições e cobrir uma área maior da coluna lombar, proporcionando resultados mais detalhados. Além disso, a integração de um módulo Bluetooth pode possibilitar a transmissão dos dados coletados em tempo real para dispositivos móveis, o que tornaria o monitoramento remoto mais viável. Essas adaptações visam aumentar a versatilidade do protótipo e expandir seu uso em diferentes contextos, como ergonomia ocupacional, reabilitação e atividades esportivas.

4. CONCLUSÃO

O protótipo desenvolvido demonstrou potencial para mapear a posição da coluna lombar e alertar desalinhamentos posturais de maneira simples e eficaz. Apesar de suas

limitações, como a quantidade reduzida de sensores, o sistema apresentou um custo acessível e aplicabilidade promissora. Melhorias futuras, como a adição de sensores e integração com dispositivos móveis podem ampliar sua precisão e viabilidade prática, consolidando sua relevância como ferramenta de suporte à saúde postural.

REFERÊNCIAS

[1] CASSER, Hans-Raimund; SEDDIGH, Susann; RAUSCHMANN, Michael. Acute Lumbar Back Pain: investigation, differential diagnosis, and treatment. Deutsches Ärzteblatt International, [S.L.], 1 abr. 2016. Deutscher Arzte-Verlag GmbH. http://dx.doi.org/10.3238/arztebl.2016.0223.

[2] NASCIMENTO, Paulo Roberto Carvalho do; COSTA, Leonardo Oliveira Pena. Prevalência da dor lombar no Brasil: uma revisão sistemática. Cadernos de Saúde Pública, [S.L.], v. 31, n. 6, p. 1141-1156, jun. 2015. FapUNIFESP (SciELO). http://dx.doi.org/10.1590/0102-311x00046114.

[3] CAMAROTTO, J. A.; SIMONELLI, A. P.; RODRIGUES, D. S. Ergonomia e trabalho. In: SIMONELLI, A. P.; RODRIGUES, D. S. (Org.). Saúde e trabalho em debate: velhas questões, novas perspectivas. Brasília: Ed. Paralelo 15, 2013. p. 33-53.

[4] BIERNATH, A. Dor nas costas: as orientações do “manual” da OMS sobre o problema. BBC, 29 jan. 2024.

[5] DE MINAS, E. Em 2050, mundo terá 843 milhões de pessoas com dor na lombar, diz estudo. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/saude-e-bem-viver/2023/06/07/interna_bem_viver,1504181/em-2050-mundo-tera-843-milhoes-de-pessoas-com-dor-na-lombar-diz-estudo.shtml>.

[6] LEMOS, S. Organização Mundial da Saúde alerta que 80% da população já teve ou terá dor na coluna. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/organizacao-mundial-da-saude-alerta-que-80-da-populacao-ja-teve-ou-tera-dor-na-coluna/>.

[7] Low back pain. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/low-back-pain>.

Autores

AUTORES

ALINE MARA OLIVEIRA (ORGANIZADORA)

Possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2012). Pós Graduada em Gestão de Projetos (FGV 2014-5015). Ministrou aulas no Centro Universitário do Planalto de Araxá(2015-2016) e no CEFET-MG nos cursos de graduação e técnicos. Tem experiência na área de Automação Industrial, Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: redes industriais, proteção de sistemas elétricos, IEC-61850, automação, instrumentação, sistemas de controle, equacionamento de controladores, sistemas multivariáveis e teoria de controle. Trabalhou na indústria no setor de projetos industrias no período de 2007 a 2015. Mestre pela Universidade Federal de Uberlândia. (2017-2019). Atualmente doutoranda no curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.(2019-2023)

OSVALDO SENA GUIMARÃES (ORGANIZADOR)

Graduação em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia Kennedy (1983), Ênfase em Engenharia de Transportes EEK (1983), Análise De Sistemas - UFMG(1985), Especialização em Gestão de Projetos de Engenharia IEC/PUC (2012), Mestrado em Estratégia FEAD (2005). Professor do curso de Engenharia Civil da Universidade do Estado de Minas Gerais (2015-2017 Divinópolis). Professor na Faculdade Senac Minas. Atua na área de ensino superior desde 1988 como Professor, Coordenador de Curso, Coordenador de Extensão, Coordenador de Iniciação Científica e de Pré-incubadora de base Tecnológica. Atua na área de Engenharia, Computação e Projetos desde 1984.

ALEXANDRE MAGNUS FERNANDES GUIMARÃES

Engenheiro eletricista com Doutorado (2009) e Mestrado (1997) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Atualmente é professor da UFRN, na Escola de Ciências e Tecnologia - ECT. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Automação de processos elétricos e industriais, atuando na área de sistemas embarcados e automação de sistemas.

ANA AUGUSTA DE CARVALHO RANGEL

Graduanda em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

ANA CAROLINA BRANTS MENEZES

Engenheira Ambiental - Universidade Estadual Paulista (UNESP)

ANDRÉA FRANCISCA FERNANDES BARBOSA

Graduação em Quimica Bacharelado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte(2001), graduação em Quimica Licenciatura pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2005), Mestrado em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2004) e Doutorado pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2008). Tem experiência na área de Química, com ênfase em Química, atuando principalmente nos seguintes temas: Extração de amostras,Cromatografia Gasosa, Inibidores de Corrosão e Caracterização de complexos. Foi professora da Universidade Federal do Maranhão (UFMA) e atualmente, professora adjunta da Universidade Federal do Semiárido (UFERSA).

ANTÔNIO ROBSON GURGEL

Professor do curso de engenharia de petróleo da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, lotado no Centro de Engenharias (2011). Possui graduação em engenharia química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2006), mestrado (2009) e doutorado (2015) pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo também pela mesma instituição. Concluiu especialização em engenharia de segurança do Trabalho (2010). Tem experiência na área de engenharia de petróleo, com ênfase em engenharia de reservatórios, atuando, principalmente, nos

AUTORES

seguintes temas: simulação numérica de reservatórios, modelagem matemática, injeção de vapor, injeção de polímeros e injeção de CO2 associados aos métodos EOR (Enhanced Oil Recovery) de recuperação melhorada de petróleo.

CÁTIA FREDERICCI

Possui graduação em Química pela Universidade Federal de São Carlos (1986), mestrado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1992) e doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais pela Universidade Federal de São Carlos (1997). Atualmente é pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, atuando no Laboratório de Processos Metalúrgicos, no Núcleo Materiais Avançados. Tem experiência na área de Engenharia de Materiais e Metalúrgica, com ênfase em vidro e cerâmica, atuando principalmente nos seguintes temas: vidro, síntese de pós, materiais odontológicos, materiais cerâmicos refratários e minérios de ferro. Atua em apoios tecnológicos junto às empresas realizando projetos de P&D&I e otimização de processos e produtos.

DANIEL VIANA DE FREITAS

Doutorando e mestre em Manejo de Solo e Água pela Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), com formação em Engenharia Civil e Ciência e Tecnologia, também pela mesma instituição. Possui ampla experiência em engenharia civil, Geoprocessamento, levantamento topográfico e uso de veículos aéreos não tripulados. Destaca-se em projetos de saneamento, com ênfase na gestão de resíduos da construção civil, além de expertise em tratamento de efluentes líquidos. Destaca-se ainda por sua contribuição no desenvolvimento e aplicação de materiais alternativos para descontaminação de efluentes.

DENER MARTINS DOS SANTOS

Pesquisas na área tecnológica envolvendo processos metalúrgicos, termodinâmicos e térmicos. Também com pesquisas envolvendo aspectos sociais, políticos e jurídicos nas tratativas das relações em ambientes de trabalho e educação; no que tange aos Direitos Humanos e melhorias da qualidade de vida. Diretor da Faculdade de Tecnologia (FAT) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) no quadriênio 2020-2023. Atualmente: Professor Associado da UERJ (2008); Professor Doutor UBM (1998). Pós-Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (USP, 2009). Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais (USP, 2002). Mestre em Engenharia Metalúrgica (UFF, 1997). Pós-Graduado em Metodologia do Ensino Superior (UBM, 1997). Graduado em Engenharia Metalúrgica (UFF, 1992).

EVANDRO CARDOZO DA SILVA

Possui graduação em ENGENHARIA MECÂNICA pela Universidade do Estado de Santa Catarina (1990) e mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (1994). Atualmente é professor associado IV da Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharias da Mobilidade do Centro Tecnológico de Joinville. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Processos de Fabricação e CAD/CAE. Concluiu em 26/2/2008 o doutorado em Engenharia Mecânica na UNICAMP com o tema de tese: "Análise Numérica do Processo de Conformação de Chapas por Jateamento de Esferas". Os temas envolvidos com o trabalho são os seguintes: shot peen forming, modelagem de processos, análise de elementos finitos, tensão residual, simulação numérica. Cursou no doutorado da UNICAMP disciplinas de otimização, elementos finitos e métodos matemáticos na Faculdade de Engenharia Mecânica e Computação Gráfica nas Faculdades de Arte e de Engenharia Elétrica. Foi coordenador do Curso de Engenharia Ferroviária e Metroviária do Centro Tecnológico de Joinville (2021-2022). Atualmente é professor da disciplina de Representação Gráfica e ministra cursos de extensão de CAD3d SolidWorks.

AUTORES

FABIANA ALVES FIORE PINTO

Engenheira Civil. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Doutora em Saneamento e Meio Ambiente. Livre-docente em Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Professora da Universidade Estadual Paulista (UNESP).

FERNANDO NUNES BELCHIOR

Graduado em 2000, recebeu o título de Mestre em 2003 e Doutor em 2006 em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU-MG, Brasil. No mestrado trabalhou com a influência de afundamentos de tensão em conversores de frequência tipo PWM senoidal. No doutorado trabalhou com dois filtros harmônicos eletromagnéticos, um voltado para a filtragem de harmônicos de sequência zero e outro destinado à filtragem de harmônicos de sequência positiva e negativa. De fev/2007 a dez/2015 foi professor associado no Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica (GQEE) no Instituto de Sistemas Elétricos e Energia (ISEE) da Universidade Federal de Itajubá, UNIFEI-MG (www.unifei.edu.br), Brasil. Atualmente trabalha como professor TITULAR na Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Federal de Goiás (UFG), no campus avançado de Aparecida de Goiânia (https://www.fct.ufg.br/). Orientou mais de 32 monografias de conclusão de curso de especialização, mais de 52 trabalhos de conclusão de curso de graduação, mais de 46 orientações de iniciação científica, 6 orientações de mestrado e mais de 5 co-orientações de mestrado. Atualmente está orientando 1 aluno de mestrado no PPGEP (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção) e 2 alunos de TCC na Engenharia Elétrica e 3 na Engenharia de Produção. Participou de mais de 284 bancas de defesas, dentre elas: 13 bancas de doutorado, mais de 14 bancas de qualificação de doutorado, mais de 62 bancas de mestrado, mais de 21 bancas de qualificação de mestrado, mais de 62 bancas de monografias de cursos de especialização e mais de 112 bancas de conclusão de curso. Publicou mais de 114 trabalhos em anais de eventos nacionais e internacionais, mais de 5 livros, mais de 18 capítulos de livros e mais de 27 textos em jornais/revistas. É revisor de artigos em conferências nacionais e internacionais e revistas técnico científicas nacionais e internacionais, com mais de 300 revisões. Suas principais áreas de interesse englobam: Qualidade da Energia Elétrica, Máquinas Elétricas, Eletrônica de Potência, Medições Elétricas, Fontes Renováveis de Energia (solar fotovoltaica, eólica, biomassa, hidrogênio) e Eficiência Energética em equipamentos e instalações elétricas. Já realizou trabalhos de consultoria junto a CPFL, DuPont, Parmalat, CEB, ONS, Elektro e outros, com participação nas campanhas de medição de Qualidade da Energia Elétrica ocorridas na UFU a serviço do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2001 e 2003. Trabalhou em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (PD) junto a CEB, CEMAT, LIGHT, CHESF, ELEKTRO, ENEL-GO. Foi vice-presidente da SBQEE - Sociedade Brasileira da Qualidade da Energia Elétrica, na Gestão 2011-2013 e foi presidente da SBQEE na Gestão 2013-2015.

GEDEÃO ALBERTO DA SILVA

Graduando em Engenharia Mecânica no UBM (2024).

JARDEL DANTAS DA CUNHA

Possui graduação em Engenharia de Materiais (2004), mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais (2008) e doutorado em Ciências e Engenharia do Petróleo, todos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Tem experiência na área de corrosão e monitoramento, tendo atuado de 2004 a 2010 em projetos em parceria com a Petrobras e Transpetro. Atualmente, é membro do Comitê Gestor do PRH/ANP 55.1 e Conselheiro da Câmara Especializada em Engenharia Química e Segurança do Trabalho do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA). Suas pesquisas focam em corrosão, especialmente na utilização de inibidores de corrosão provenientes de extratos vegetais do semiárido e economia circular.

JEFERSON CARVALHO DOS SANTOS

Graduando em Engenharia Mecânica no UBM (2024).

AUTORES

JONATAN ILÍDIO DA SILVA

Graduando em Engenharia Mecânica no UBM (2024). Atuou como professor de Matemática na Secretaria de Educação do Estado do Rio de Janeiro. Graduado em Licenciatura Plena em Matemática, UBM (2004).

JUSCIMARA RODRIGUES SILVA

Engenheira Química. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental - Universidade Estadual Paulista (UNESP)

KEILA REGINA SANTANA

Possui graduação em Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de Campina Grande (2007). Concluiu o Mestrado do Programa de pós- graduação em ciência e engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2009) e o doutorado pelo programa de pós graduação em Química pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (2014), . E atualmente é professora professora do curso Engenharia de Petróleo da Universidade Federal Rural do Semi-árido, campus Mossoró, atuando principalmente nos seguintes temas: fluidos de perfuração, completação e estimulação, polímeros aplicados a industria do petróleo e engenharia de reservatórios, com ênfase na recuperação avançada de petróleo.

LARISSA ANTÔNIA BARBOSA LIMA

Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade de Fortaleza. Especializada em Mobilidade Urbana pela Universidade de Fortaleza UNIFOR

LÍVIAN CERQUEIRA MOUSINHO CORDEIRO DE SOUSA

Graduanda em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN). Vice-presidente do Engineering in Medicine and Biology Socity (EMBS) do IEEE UFRN. Voluntária no Instituto de Ensino e Pesquisa Alberto Santos Dumont (ISD) na área de memória e comportamento animal.

LUCAS DE SÁ PENAFORTE

Bacharel em Ciências e Tecnologia (2023) e atualmente graduando em Engenharia Biomédica na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

LUIS GUILHERME BARBOSA CUSTÓDIO

Graduando em Engenharia de Computação pela Universidade Federal de Goiás, com previsão de conclusão em 2025. Atualmente, atua como pesquisador no Centro de Excelência em Redes Inteligentes e Serviços Avançados (Cerise/UFG), onde é bolsista pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Fapeg). No Cerise/UFG, dedica-se a pesquisas relacionadas ao uso de Rádios Definidos por Software para implementação e avaliação de desempenho de redes móveis 5G e pós-5G, além de explorar a Arquitetura de Rede de Acesso de Rádio Aberta. Entre 2022 e 2023, realizou estágio na empresa Bayer S.A., com foco em business intelligence e gestão de negócios, atuando na Diretoria de Negócios Cerrados Leste, setor de agronegócio da Bayer no Brasil, durante esse período, contribuiu para a análise de dados e desenvolvimento de estratégias voltadas à otimização de processos e tomada de decisões no mercado agrícola. Desde 2024, é servidor público ativo na Prefeitura Municipal de Inhumas, exercendo a função de coordenador durante a gestão 2020-2024 e dando continuidade no mesmo cargo na gestão 2025-2028. Suas atividades incluem a orquestração de sistemas e processos administrativos, otimização de fluxos operacionais, desenvolvimento e suporte em infraestrutura, análise e gestão de dados para tomada de decisão, além da administração e integração de sistemas de informação voltados à eficiência governamental. Em 2022, concluiu uma especialização em Machine Learning pela Stanford University, sob a orientação do professor Andrew Ng. Seus principais interesses de estudo abrangem sistemas de

AUTORES

telecomunicações avançados, aprendizado de máquina, aplicações em redes móveis de última geração, análise preditiva de dados e desenvolvimento de soluções inteligentes.

MARCUS VINICIUS BATISTA DE MORAIS

Discente graduando do curso de Engenharia de Petróleo, na Universidade Federal Rural do Semi-Árido- UFERSA. Tenho afinidade com a área de exatas e ciências naturais, me considero hábil para novos aprendizados e com uma extrema facilidade de captação de novos conhecimentos. Atualmente estou como pesquisador do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo (PRH 55.1 - ANP). As témáticas de pesquisa foram: à análise do VPL e TIR em reservatórios convencionais, estudo de isotermas de adsorção, inibidor de corrosão da linha verde e, atualmente, estou realizando pesquisas acerca de recuperação avançadas utilizando CO2.

MARIA BEATRIZ DA COSTA GONÇALVES

Bacharel em Ciências e Tecnologia (2022) e graduanda de Engenharia da Computação na Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN.

MIZAEL CRISTINO DE OLIVEIRA QUEIROZ

Graduando em Ciências e Tecnologia (2024.2) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN.

NATÁLIA SOUZA DE JESUS

Graduada em Engenharia de Computação pela Universidade Federal de Goiás (2024) com formação em Técnico em Informática pelo Instituto Federal da Bahia (2018). Contribuiu como voluntária em pesquisa de aplicações de IoT para semáforos inteligentes entre 2021 e 2022, visando ter experiência na área de científica. Também contribuiu para o projeto de pesquisa de Sistema Eletrônico de Gestão do Transporte Escolar (SETE) para obter experiência na área de programação, manutenção de APIs e documentações. Desde 2022, atua como programadora, sendo nos anos de 2022 e 2023 estagiária do Centro de Pesquisa em Alimentos da Universidade Federal de Goiás prestando manutenção ao sistema legado em Java e criação e implantação de novo sistema em PHP. No seu trabalho atual, atua como desenvolvedora em Delphi prestando manutenção e criação de novas rotinas ao sistema legado de uma empresa privada, além de estar desenvolvendo artigo na área de Data Science e Power BI com foco na área da saúde. Os seus principais interesses de estudos são temas voltados a ciências de dados com foco em investigação e produção de conhecimento sobre questões acerca dos processos e gestão de recursos da área da saúde.

PAULO CUCONATO

Professor Contratado FAT/UERJ (2021–2023), Consultor da Comissão de Mediação de Conflitos (OAB/VR/RJ, 2018–2019), Mediador Judicial (TJRJ/NUPEMEC/CEJUSC, 2018–2019), Enfermeiro Fiscal (COREN/RJ, 1997–2012), Conselheiro Titular Municipal de Saúde do Município de Resende (1997–2001). Enfermeiro em hospitais (1988-1997). Mestre em Direito (Estácio, 2016). Pós-Graduações: Direito das Famílias e Direito das Sucessões (UCAM, 2021), MBA Gestão em Saúde e Controle de Infecção (FACEAT, 2021), Psicologia Jurídica (UCAM, 2017), Enfermagem Gerencial (Faculdade Luiza de Marillac, 2003). Graduações: Bacharel em Direito (UGB, 2012) e Enfermagem e Obstetrícia (UCP, 1987).

PAULO DE SOUZA PACHECO JUNIOR

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Goiás com experiência na implementação de programas voltados para a otimização de recursos e eficiência operacional. Possui forte atuação em projetos de eficiência energética e gestão estratégica de consumo industrial, aliando análise técnica, coordenação de equipes multidisciplinares e comunicação institucional. Em 2023, liderou a implementação do Programa de Eficiência Energética em uma indústria

AUTORES

farmacêutica de Anápolis, com foco na redução do consumo das principais matrizes energéticas da planta. Realizou estudos de viabilidade técnica e econômica, utilizando métricas de retorno e avaliação de riscos para embasar decisões estratégicas. Coordenou uma equipe multidisciplinar, promovendo a captação de ideias para a otimização e execução de projetos focados em melhoria contínua. Além do trabalho técnico, estruturou e implementou a frente de comunicação do programa, disseminando boas práticas de eficiência energética tanto para a equipe técnica quanto para a equipe de gestão, contribuindo para a formação de uma cultura voltada para o pilar ESG (Enviromental,Social and Governance). Atualmente, atua no setor de Qualificação de Equipamentos, sendo responsável por conduzir processos de validação e qualificação de utilidades, assegurando o cumprimento das normas regulatórias e dos padrões de qualidade.

PAULO FELIPE JUNIOR

Experiência em termodinâmica, mecânica, cálculo numérico e matemática. Atualmente professor Adjunto na Faculdade de Tecnologia (FAT) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doutorado e Mestrado em Engenharia (UFF).

THYAGO CARVALHO MARQUES

Doutor em Engenharia Elétrica e de Computação pela UNICAMP. Pós-graduado em Economia Financeira pela UNICAMP e Pós-graduado em Planejamento Tributário pela FACE/UFG. Professor da UFG. Tem experiência na área de engenharia econômica e financeira, otimização matemática, Business Intelligence. É coordenador do Curso de Especialização em Engenharia Econômica e Financeira para Projetos de Investimentos. É coordenador de projetos do Centro de Excelência de Inteligência Artificial (CEIA) e pesquisador EMBRAPII (Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial). Foi subsecretario de Ciência, Tecnologia e Inovação de Goiás.

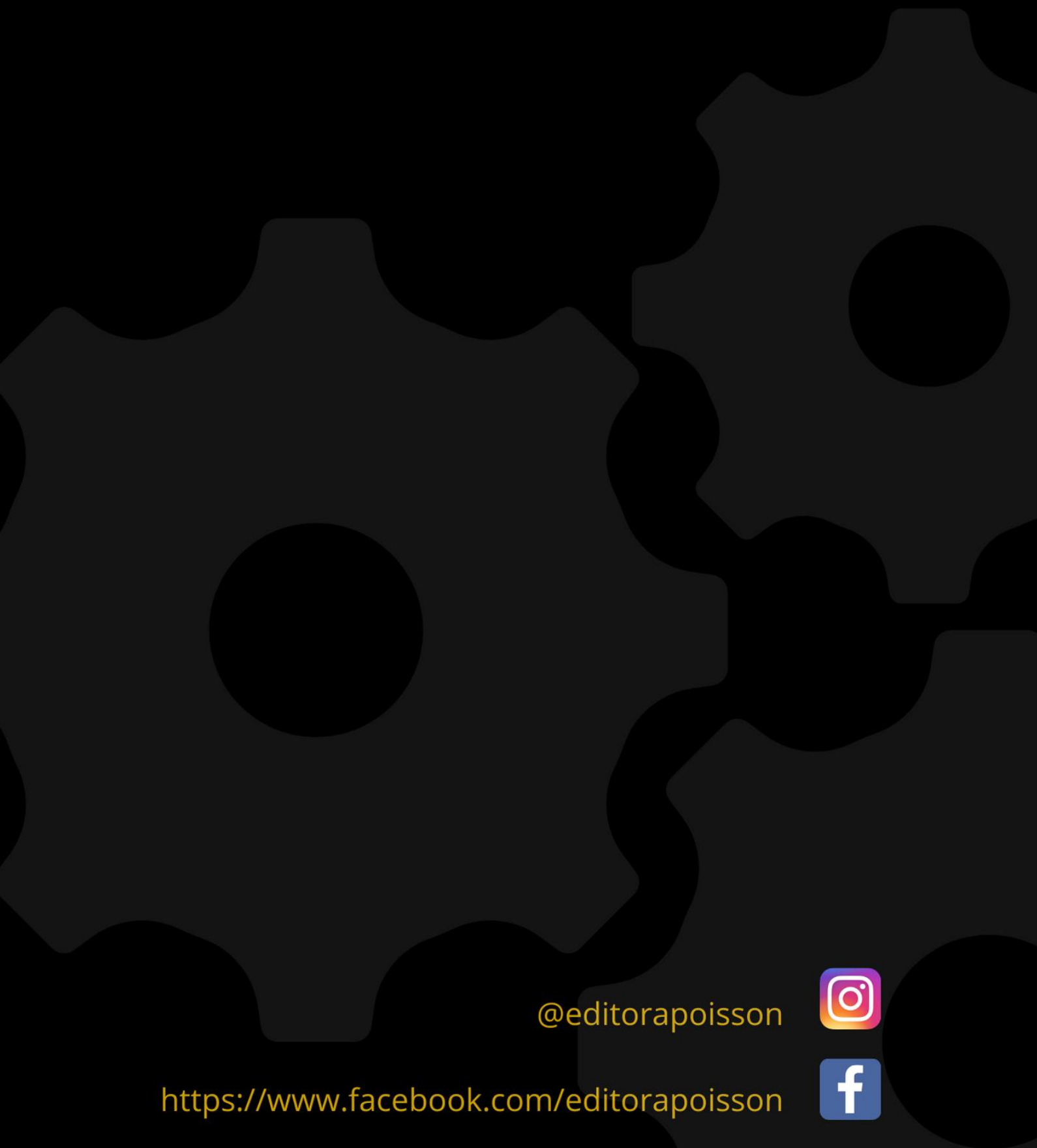
VIVIANE PÍCCOLO CAMPOS

Especialização em Mobilidade Urbana – UNIFOR. Graduação em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade Nordeste

WENDEL SILVA CABRAL

Graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB) e em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Especialista em Auditoria, Avaliações e Perícias em Engenharia. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal de Campina Grande e doutor em Engenharia de Transporte pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Professor Adjunto da UFERSA na área de Engenharia de Transportes, Geotecnia, Mecânica dos solos e Topografia. Experiência na área de Infraestrutura, com ênfase em terraplenagem, pavimentação, solos, projeto e drenagem.

www.poisson.com.br
contato@poisson.com.br



@editorapoisson

https://www.facebook.com/editorapoisson